

CLASIFICADO



**ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.**

GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA

Fondo de Prevención y Atención de Emergencias

**FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS
FOPAE**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES – FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA 1 ESTE NO. 19A-40, EDIFICIO MARIO LASERNA
BOGOTÁ, COLOMBIA**

**CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE
BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN
DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA “MEJORAMIENTO EN EL
CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES
MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA”**

Convenio 453 de 2010

**VOLUMEN 1
INFORME FINAL**

ORIGINAL

Mayo de 2011

Nota especial: “De acuerdo con el artículo 20 de la Ley 23 de 1982, los Derechos de Autor pertenecen al FOPAE. La solicitud para reproducir este documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE.”

CLASIFICADO



**ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.**

GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA

Fondo de Prevención y Atención de Emergencias

**FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS
FOPAE**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES – FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA 1 ESTE NO. 19A-40, EDIFICIO MARIO LASERNA
BOGOTÁ, COLOMBIA**

**CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE
BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN
DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA “MEJORAMIENTO EN EL
CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES
MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA”**

Convenio 453 de 2010

**VOLUMEN 1
INFORME FINAL**

ORIGINAL

Mayo de 2011

Nota especial: “De acuerdo con el artículo 20 de la Ley 23 de 1982, los Derechos de Autor pertenecen al FOPAE. La solicitud para reproducir este documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE.”

CLASIFICADO

Convenio especial de cooperación de ciencia y tecnología entre el Fondo de Prevención y Atención de emergencias de Bogotá- FOPAE y la Universidad de los Andes para la ejecución del proyecto de ciencia y tecnología “Mejoramiento en el conocimiento en riesgo tecnológico – Accidentes industriales mayores en el Distrito Capital. Eventos con nube tóxica”

**Fondo de Prevención y Atención de Emergencias
FOPAE
Diagonal 47 No. 77 B – 09 Interior 11
PBX 4297414
www.fopae.gov.co y www.sire.gov.co
Bogotá – Colombia**

Director General FOPAE: Guillermo Escobar Castro
Subdirectora Área Técnica y de Gestión: Darwin Javier Ortiz González
Profesional Especializado Gestión Sectorial: Jesús Enrique Rojas Ochoa
Profesional Especializado Investigación y Desarrollo: Lindon Losada Palacios
Profesional Especializado - Gestión Sectorial - Industria: Faride Patricia Solano Hamdan

Elaborado por:
Felipe Muñoz – Director de Proyecto
Jorge Mario Gómez – Especialista Simulación
Ángela Blanco – Especialista SIG
Indira Barrios – Auxiliar de simulación
Alejandro Rodríguez Cuellar – Personal de apoyo
Carlos Murillo – Auxiliar de investigación
Nathalia Torres – Auxiliar administrativo
Claudia Patricia Moreno – Auxiliar administrativo
Sergio García Gutiérrez – Personal de apoyo

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

**Convenio 453 de 2010
VOLUMEN 1
INFORME FINAL**

ORIGINAL

Mayo de 2011

Nota especial: “De acuerdo con el artículo 20 de la Ley 23 de 1982, los Derechos de Autor pertenecen al FOPAE. La solicitud para reproducir este documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE.”

RESUMEN

El Informe Final del proyecto presenta una guía para la modelación de escenarios de accidentes *con gases más densos* que el aire, partiendo del reporte de emergencias presentadas en la industria a nivel global y puntualizando los modelos de dispersión adecuados para la simulación de este tipo de emergencias, con el objetivo de apoyar la labor realizada en el Distrito para la prevención de emergencias *asociadas a actividades* industriales. A partir de estos modelos se generaron las herramientas de simulación y de aplicación SIG, de las cuales se presenta en el informe, el manual y los resultados de la simulación de los escenarios de cloro y de amoníaco para las condiciones del Distrito. Adicionalmente se adjuntan los instaladores para el SIG y el SiDiG.

Este informe es el resultado del trabajo realizado en el marco del convenio 453 de 2010, establecido entre el FOPAE y la Universidad de los Andes y cuyo objeto fue "Adelantar el Proyecto de Apropiación Pública de Ciencia y Tecnología "Mejoramiento en el Conocimiento en Riesgo Tecnológico – Accidentes Industriales Mayores en el Distrito Capital. Eventos con Nube Tóxica", a través de la cooperación con una universidad que cuente con experiencia infraestructura y personal especializado sobre el tema de que trata el proyecto."

Entre la información presentada se hace particular énfasis en la revisión bibliográfica de los modelos existentes para la simulación de dispersión de gases más densos que el aire, las actividades industriales de alto riesgo, los criterios para la determinación de áreas de influencia, la justificación de la selección de los modelos empleados para la generación de herramientas de simulación y la visualización de resultados. Los modelos de libre distribución también son evaluados.

En este informe se encuentra además disponible la información para la construcción de escenarios críticos para la evaluación de la dispersión de nubes tóxicas, así como una memoria de cálculo asociada a dos escenarios críticos en la ciudad de Bogotá para cloro y amoníaco. Estos dos escenarios fueron evaluados mediante la herramienta de simulación generada como producto de este convenio, SiDiG y comparados con herramientas de libre distribución como ALOHA®.

Como evidencia del trabajo conjunto en este convenio por parte de los dos entes participantes, será posible encontrar información relacionada con reuniones de carácter técnico y administrativo que le dieron seguimiento a las labores ejecutadas.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	4
GLOSARIO DE SIGNOS, SÍMBOLOS, UNIDADES, ABREVIATURAS, SIGLAS O TÉRMINOS	10
SÍMBOLOS.....	10
UNIDADES.....	23
SIGLAS.....	24
GLOSARIO.....	26
PRESENTACIÓN.....	27
INTRODUCCIÓN.....	28
1. MARCO JURÍDICO: CONTEXTO INTERNACIONAL, NACIONAL Y DISTRITAL.....	32
2. ACCIDENTE INDUSTRIAL MAYOR: RETORNO DE EXPERIENCIAS - EVENTOS CON NUBE TÓXICA.....	35
3. ANÁLISIS DE RIESGOS: FUNDAMENTOS.....	47
3.1 Actividades industriales de alto riesgo.....	47
3.2 Definiciones básicas para el análisis de riesgos.....	48
4. ANÁLISIS DE RIESGOS: REPORTE.....	51
4.1 Estudio técnico.....	51
4.1.1 Las áreas de influencia de riesgo industrial.....	51
4.1.2 La cartografía de las consideraciones del medio.....	51
4.1.3 Superposición de la cartografía de las consideraciones del medio, por cada área de influencia de riesgo industrial.....	52

5. ANÁLISIS DE RIESGOS: ÁREA DE INFLUENCIA DE EFECTOS TÓXICOS POR DISPERSIÓN DE GASES MÁS DENSOS QUE EL AIRE (NUBE TÓXICA)	54
5.1 Modelos para la dispersión de gases más densos que el aire.....	57
5.1.1 Modelos de caja.....	57
5.1.2 Modelos de pluma.....	59
5.1.3 Modelo SLAB	62
5.1.4 Modelo de Britter-McQuaid.....	83
5.1.5 Modelo CFD- Herramientas comerciales.....	90
5.1.6 Modelos en software de libre distribución.....	92
5.2 Selección de modelos.....	93
5.2.1 Validación de la herramienta.....	93
5.2.2 Casos de estudio.....	112
6. ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS	113
6.1 Aproximación empírica.....	113
6.1.1 Daño a personas.....	113
7. DESARROLLO DE LINEAMIENTOS Y ANÁLISIS DE CASO EN EVENTOS DE DISPERSIÓN DE NUBES TÓXICAS: CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS	115
7.1 Definición de la finalidad.....	115
7.2 Escenarios críticos.....	116
7.2.1 Estructura de datos	118
7.2.2 Modelo SLAB.....	118
7.2.3 Modelo Britter-McQuaid.....	125
7.3 Obtención de parámetros de entrada.....	128
7.3.1 Tipo de derrame.....	128
7.3.2 Parámetro del subpaso numérico.....	128
7.3.3 Fracción másica del líquido inicial.....	129
7.3.4 Temperatura del material en la fuente.....	129

7.3.5	Flujo másico de la fuente.....	130
7.3.6	Modelos Fuente.....	130
7.4	Área de la fuente.....	179
7.5	Duración de la fuente continua.....	181
7.6	Altura de la fuente.....	182
7.7	Velocidad del viento del ambiente.	182
7.8	Clases de estabilidad.....	184
8	DESARROLLO DE COMITÉS TÉCNICOS.....	185
8.1	Documentos referencia.....	187
8.2	Análisis de casos.....	188
8.3	Herramientas computacionales.....	189
8.4	Acompañamiento.....	189
9.	DIVULGACIÓN Y FORTALECIMIENTO TÉCNICO.....	191
9.1	Construcción y socialización del software de simulación SiDiG.....	191
9.2	Construcción del aplicativo SIG, Modelo Zonas.....	191
9.3	Capacitación en los modelos fuente.....	192
9.4	Construcción de escenarios de aplicación.....	192
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	197
10.1	Conclusiones.....	197
10.2	Recomendaciones.....	198
11.	ANEXOS.....	200
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	349

TABLA DE CONTENIDO ANEXOS

A. Anexo A: HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.....	200
A.1. SiDiG.....	200
A.1.1 Diseño de la herramienta computacional.....	200
A.1.2 Diseño del modelo SLAB.....	201
A.1.3 Diseño del modelo de Britter-McQuaid.....	207
A.1.4 Validación de la herramienta.....	209
A.1.5 Manual SiDiG.....	223
A.2. Herramienta de visualización geográfica SIG.....	242
A.2.1 Instalación de la herramienta.....	243
A.2.2 Trabajando con el aplicativo.....	247
A.2.3 Actualizando datos.....	256
B. Anexo B: CASOS DE ESTUDIO - INFORMACIÓN DE ALMACENAMIENTO Y MEMORIAS DE CÁLCULO.....	260
B. 1 AMONIACO (NH ₃).....	260
B. 1.1 Almacenamiento de amoníaco.....	260
B. 1.1.1 Almacenamiento a presión.....	261
B. 1.1.2 Contenedores semirefrigerados.....	261
B. 1.1.3 Almacenamiento con refrigeración.....	262
B. 1.2 Escenarios de amoníaco.....	262
B. 1.2.1 ESCENARIO 1: Ruptura de tubería entre el tanque de transporte y el tanque estacionario.....	264
B. 1.2.2 ESCENARIO 2: Fallo en la válvula de trasiego, emisión directamente desde el tanque.....	286
B. 1.3 Liberación de acuerdo al tipo de falla.....	300
B. 2 CLORO (Cl ₂).....	301
B. 2.1 Almacenamiento cloro.....	301
B. 2.2 Escenarios de cloro.....	304
B. 2.2.1 ESCENARIO 1: Daño en la válvula en un cilindro de 68 kg.....	305

B. 2.2.1	ESCENARIO 2: Daño en la válvula en un en un tanque de 1 t.....	319
B. 2.3	Liberación de acuerdo al tipo de falla.....	329
C.	Anexo C: ACTAS COMITÉS TÉCNICOS.....	331
D.	Anexo D: ACTAS REUNIONES.....	343

GLOSARIO DE SIGNOS, SÍMBOLOS, UNIDADES, ABREVIATURAS, SIGLAS O TÉRMINOS

SÍMBOLOS

t_r	Duración de la emisión
u	Velocidad del viento
x	Distancia en el eje x

Modelo caja

(V)	Volumen
b_z	Altura de la nube
(r)	Radio de la nube
$w_{e,e}$	Velocidad de arrastre en el borde de la nube
$w_{e,t}$	Velocidad de arrastre en la superficie superior
(x)	Posición en el eje x
C	Constante
$V(t)$	Volumen en función del tiempo
g'	Gravedad efectiva
t	Tiempo
π	Número Pi

Modelo de pluma

K_x	Difusividad en la dirección x
K_y	Difusividad en la dirección y
K_z	Difusividad en la dirección z
σ_y	Coficiente de dispersión de Pasquill-Gifford en el eje y
σ_z	Coficiente de dispersión de Pasquill-Gifford en el eje z

y	Eje perpendicular a la velocidad del viento
H	Altura sobre el nivel del suelo
c	Concentración
m	Flujo másico
t	Tiempo
x	Dirección del viento
z	Eje vertical

Modelo SLAB

\overline{U}_a	Velocidad del viento del ambiente promedio
h	Altura de la nube
h_{pr}	Altura máxima alcanzada por el jet o por la pluma desde el punto de emisión.
h_s	Altura de la columna
h_{se}	Altura del jet con densidad similar a la del aire
A_{pr}	Área de viento cruzado de la nube
B	Mitad del ancho de la nube
B_{pr}	Mitad del ancho de la nube en el punto de máximo ascenso
B_s	Mitad del ancho de la fuente
B_x	Mitad de la longitud de la nube (eje x)
B_y	Mitad de la longitud de la nube (eje y)
C_{gr}	Variable intermedia
C_p	Calor específico
C_{pa}	Calor específico del aire del ambiente
C_{pk}	Concentración volumétrica en la máxima altura del jet
C_{ps}	Calor específico de la fuente

C_{tav}	Concentración promediada en el tiempo
D_s	Diámetro de la columna
F_a	Variable intermedia
F_r	Variable intermedia
F_b	Variable intermedia
F_{sw}	Variable intermedia
L_a	Longitud de Monin-Obukhov ambiental
L_{a0}	Longitud de Monin-Obukhov ambiental a nivel del suelo. Ver z_L
M_a	Peso molecular del aire seco
M_{ae}	Peso molecular del aire
M_s	Peso molecular de la fuente
M_w	Peso molecular del agua
P_a	Presión ambiental
Q_s	Tasa de emisión de la fuente
R_c	Constante de los gases
R_v	Variable intermedia
S_g	Variable intermedia
T_a	Temperatura del ambiente
T_s	Temperatura de la fuente
U_*	Velocidad del viento del ambiente a una altura de 4 m. Valor de velocidad de fricción dentro de la nube
U_a	Velocidad del viento del ambiente a la altura de la columna
U_{a*}	Velocidad de fricción del ambiente
U_{e*}	Velocidad de fricción efectiva
U_g	Variable intermedia

U_{mh}	Variable intermedia
U_{mg}	Variable intermedia
U_{pr}	Velocidad en la dirección del viento en el punto de máximo ascenso
U_{t*}	Variable intermedia
V_a	Variable intermedia
V_e	Velocidad de arrastre horizontal
V_{ex}	Velocidad de arrastre horizontal en la dirección del viento
V_{ey}	Velocidad de arrastre horizontal en la dirección del viento cruzado
V_g	Velocidad de flujo gravitacional de viento cruzado horizontal
V_j	Variable intermedia
V_s	Variable intermedia
W_c	Variable intermedia
W_e	Velocidad de arrastre vertical
W_s	Velocidad de la fuente
X_c	Distancia en la dirección del viento del centro de masa del puff
X_{pr}	Distancia en la dirección del viento a la que se alcanza la altura máxima del jet
Z_c	Parámetro de altura de la nube
Z_{cpr}	Altura del centro de la pluma
Z_r	Variable intermedia
b_x	Parámetro de la mitad de la longitud de la nube (eje x)
b_y	Parámetro de la mitad del ancho de la nube (eje y)
c_1	Constante
c_2	Constante

f_{pc}	Energía de cambio de fase
f_t	Flujo del calor del suelo
f_u	Fricción en la dirección del viento
f_v	Flujo de velocidad cruzado
f_{vg}	Fricción en la dirección del viento cruzado
f_w	Fricción vertical
m_{da}	Concentración másica del aire seco
m_{ed}	Concentración másica de las gotas de la emisión
m_{ev}	Concentración másica del vapor de la emisión
m_{pr}	Concentración másica en el punto de máximo ascenso
m_w	Concentración másica de agua total
m_{wa}	Concentración másica del vapor de agua en el ambiente
m_{wd}	Concentración másica de las gotas de agua
m_{wv}	Concentración másica de vapor de agua
t_{av}	Tiempo para promediar la concentración
t_{pk}	Tiempo de la concentración máxima
t_{sd}	Duración de la emisión (tiempo)
z_0	Longitud de la rugosidad del suelo
z_L	Parámetro de estabilidad para $s \geq 4$
α_g	Variable intermedia
β_x	Parámetro de la mitad de la longitud de la nube
β_y	Parámetro de la mitad del ancho de la nube
ρ_a	Densidad del aire del ambiente
ρ_{pr}	Densidad de la nube en el punto de máximo ascenso
ρ_s	Densidad de la fuente

ρ_{sl}	Densidad de la fuente en fase líquida
ρ_{wl}	Densidad del agua en fase líquida
φ_h	Función de Monin-Obukhov
φ_m	Momento de la función de Monin-Obukhov
$\varphi_{m\infty}$	Variable intermedia
Erf	Función de error de Gauss
h	Altura de la nube
B	Mitad del ancho de la nube
C	Concentración volumétrica de la nube
H	Altura de la capa de mezcla
L	Longitud de Monin-Obukhov
R	Variable intermedia
$S(L_a)$	Variable intermedia
T	Temperatura
U	Velocidad de la nube en la dirección del viento
b	Parámetro de la mitad del ancho de la nube
g	Aceleración de la gravedad
k	Constante de Von Karman
m	Concentración de masa, masa promedio
s	Parámetro que corresponde a las clases de estabilidad atmosférica
t	Tiempo de recorrido del centro de masa
x	Distancia en la dirección del viento
z	Altura
α	Variable intermedia de la ecuación de estado
β	Parámetro de la mitad del ancho de la nube

γ	Variable intermedia de la ecuación de estado
δm_{epc}	Incremento en la concentración de masa del vapor de la emisión
δm_{wpc}	Incremento en la concentración de masa del agua
δU	Variable intermedia
ρ	Densidad de la nube
σ	Variable intermedia
τ	Variable intermedia

Modelo Britter-McQuaid

L_b	Escala de flotabilidad
V_0	Volumen de una emisión instantánea
b_0	Radio de la nube en la fuente de emisión
g_0	Término de gravedad corregida ó flotabilidad de la emisión inicial
u_a	Velocidad de advección
v_0	Flujo volumétrico de la emisión
x_u	Extensión de la pluma en contra del viento
ρ_a	Densidad del aire del ambiente
D	Dimensión característica de la fuente
b	Radio de la nube y ancho medio de la nube en el tiempo t
$b(x)$	Crecimiento del ancho lateral de la pluma en la dirección del viento
c	Concentración promedio de la pluma (emisión continua), máxima concentración en la dirección del viento (emisión instantánea).
c^*	Concentración de interés a corregir por condiciones no isotérmicas.

g	Aceleración de la gravedad
t	Tiempo de llegada de la nube a la distancia segura
u	Velocidad del viento promedio a una altura de 10 m
x	Distancia en la dirección del viento a la cual la concentración promedio en el eje de la pluma es c . Distancia segura
ρ	Densidad de la fuente

Parámetros de entrada a los modelos

f_l	Fracción másica del líquido inicial
f_v	Fracción másica del vapor inicial
T_0	Temperatura de almacenamiento
T_b	Temperatura punto de ebullición
TS	Temperatura del material en la fuente
P_a	Presión atmosférica
$P_{almacenamiento}$	Presión almacenamiento
γ	Relación de capacidad calorífica C_p/C_v
D	Diámetro de la piscina
π	Número Pi
A	Área de la fuente
$A_{Confinamiento}$	Área en la cual el material se encuentra confinado o esparcido
$A_{Liberación}$	Área de la fuga o de la ruptura
$A_{Transversal}$	Área de la fuente jet o instantánea (explosión) después de la expansión
ρ_l	Densidad del líquido en la fuente
ρ_v	Densidad del vapor en la fuente
ρ_m	Densidad de la mezcla líquido/vapor

$QTIS$	Masa de la fuente instantánea
H	Altura de la fuente
WMS	Peso molecular de la sustancia emitida
R_c	Constante de los gases ideales en J/ (mol-K)

Modelos fuente

- **Flujo de líquido (a través de agujeros y tuberías)**

π	Número Pi
P	Presión
ρ	Densidad del fluido
u	Velocidad del fluido
\bar{u}	Velocidad instantánea promedio del flujo
g_c	Constante gravitacional
α	Factor adimensional de corrección del perfil de velocidad
g	Aceleración de la gravedad
z	Altura por encima del nivel de referencia
F	Término de pérdidas netas por fricción
W_s	Trabajo mecánico
\dot{m}	Tasa de flujo másico
Δ	Diferencia entre el estado final y el estado inicial
Q_m	Tasa de liberación de la sustancia desde la fuente
C_1	Coeficiente de descarga constante
C_0	Coeficiente de descarga constante con valores entre 0.61 y 1
P_g	Presión manométrica
h_L	Altura del líquido por encima del punto de fuga

h_L^0	Altura inicial del líquido por encima del punto de fuga
A_t	Área transversal del tanque
t	Tiempo de la emisión
t_e	Tiempo de vaciado
A	Área transversal de la fuga
V	Volumen del líquido
D	Diámetro del tanque
K_f	Pérdida de carga superior
f	Factor de fricción de Fanning
L	Longitud del flujo
d	Diámetro de la tubería o de la trayectoria del flujo
Re	Número de Reynolds
ε	Rugosidad del tubo
K_1	Constante adimensional (Método K-2)
K_∞	Constante adimensional (Método K-2)
DI	Diámetro interno

- **Líquidos Flash**

Q_m	Tasa de liberación de la sustancia desde la fuente
C_p	Capacidad calorífica a presión constante
\bar{C}_p	Capacidad calorífica a presión constante promedio
Q	Calor de la sustancia evaluado entre la temperatura de almacenamiento y la temperatura de ebullición.
A	Área transversal de la fuga
C_0	Coefficiente de descarga constante con valores entre 0.61 y 1
m	Masa de la sustancia

m_v	Masa del vapor
m_l	Masa del líquido
ρ_f	Densidad del líquido
p^{Sat}	Presión de saturación
T_0	Temperatura del líquido antes de la despresurización
T_b	Punto de ebullición del líquido despresurizado
ΔH_v	Entalpía de vaporización de la sustancia
$\Delta \bar{H}_v$	Entalpía de vaporización promedio
A	Área de fuga
v_{fg}	Diferencia en volumen específico entre el vapor y el líquido
T	Temperatura del líquido
g_c	Constante gravitacional
f_v	Fracción de vapor
m_v	Masa de vapor
G	Flujo másico por unidad de área

- **Flujo de vapor (a través de agujeros y tuberías)**

Q_m	Tasa de liberación de la sustancia desde la fuente
P	Presión
ρ	Densidad del fluido
F	Término de pérdidas netas por fricción
α	Variable intermedia de la ecuación de estado
g_c	Constante gravitacional
Δ	Diferencia entre el estado final y el estado inicial
\bar{u}	Velocidad instantánea promedio del flujo
C_1	Coefficiente de descarga constante

C_0	Coeficiente de descarga constante con valores entre 0.61 y 1
P	Presión ambiente
P_0	Presión de almacenamiento del gas
ρ_0	Densidad inicial
C_p	Capacidad calorífica a presión constante
C_v	Capacidad calorífica a volumen constante
M	Peso molecular de la sustancia
γ	Relación de capacidad calorífica C_p/C_v
A	Área de fuga
g_c	Constante gravitacional
R_g	Constante de los gases ideales
T_0	Temperatura inicial de la sustancia
\dot{m}	Tasa de flujo másico
Ma	Número de Mach
a	Velocidad del sonido
G	Flujo másico por unidad de área
Y_g	Factor de expansión del gas
K_1	Constante adimensional (Método K-2)
K_∞	Constante adimensional (Método K-2)
K_f	Pérdida de carga superior
f	Factor de fricción de Fanning
L	Longitud de la tubería de flujo
d	Diámetro de la tubería o de la trayectoria del flujo
Re	Número de Reynolds
$P_{Chocked}$	Presión de choque o la máxima presión aguas abajo

Q_{choked} Flujo de choque o máximo flujo

q Calor

- **Piscina de evaporación o ebullición**

Q_m Tasa de liberación de la sustancia desde la fuente, flujo másico

p^{Sat} Presión de saturación a la temperatura del líquido

p Presión parcial del vapor del gas estancado por encima del líquido

M Peso molecular de la sustancia

K Coeficiente de transferencia de masa a través de un área A

A Área de la piscina

R_g Constante de los gases ideales

q_g Flujo de calor desde el suelo

T_L Temperatura absoluta del líquido

T_g Temperatura del suelo

T Temperatura del líquido en la piscina

K_s Conductividad térmica del suelo

π Número Pi

α_s Difusividad térmica del suelo

t Tiempo transcurrido luego del derrame

ΔH_v Entalpía de vaporización de la sustancia

UNIDADES

°C	Grados centígrados
atm	Atmósferas
cm	Centímetros
J	Joules
K	Grados Kelvin
kg	Kilogramos
kg/s	Flujo másico
m	Metros
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
mg	Miligramos
min	Minutos
mol	Moles
ppm	Partes por millón
s	Segundos

SIGLAS

LPG	Gas licuado del petróleo (GLP), LPG por su sigla en inglés.
LNG	Gas natural licuado (GNL), LNG por su sigla en inglés.
CFD	Mecánica de fluidos computacional (MFC), CFD (Computer Fluid Dynamics) por su sigla en inglés.
FLACS	Flame Acceleration Simulator
CAD	Diseño asistido por computador (DAC), CAD (Computer Aided Design) por su sigla en inglés.
AEGL	Valor de referencia a exposiciones agudas (VREA), AEGL (Acute Exposure Guideline Levels) por su sigla en inglés
LFL	Límite inferior de inflamabilidad (LII), LFL (Lower Flammable Limit) por su sigla en inglés.
NWS	Servicio Nacional del Clima
TLV-TWA	Valor Límite Umbral Media Ponderada en el Tiempo, TLV-TWA (Threshold limit value - Time weighted average) por sus siglas en inglés.
TLV-STEL	Valor Límite Umbral Límite de exposición a corto plazo, TLV-STEL (Threshold limit value - Short-term exposure limit) por sus siglas en inglés.

Siglas modelo SLAB

IDSPL	Tipo de derrame
RHO	Densidad característica del material de la fuente
TS	Temperatura del material de la fuente
QT	Flujo volumétrico de la fuente
R	Radio de la fuente
RHOA	Densidad característica del aire del ambiente
UA	Velocidad media del viento del ambiente a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo

GLOSARIO

Modelo de dispersión

Conjunto de correlaciones matemáticas que describen el comportamiento de las sustancias en la atmósfera. Puede tener bases empíricas o ser formulado a partir de las propiedades físico químicas de la sustancia y del medio en el cual se dispersan.

SLAB

Modelo de dispersión para gases más densos que el aire. Este modelo emplea dos métodos de dispersión, el primero corresponde a la dispersión de pluma en estado estable y el segundo a modo puff en estado transitorio. Se basa en ecuaciones de conservación de masa, momento, energía y especie.

Britter McQuaid

Modelo empírico de dispersión para gases más densos que el aire. Este emplea monogramas y formulaciones a partir de correlaciones entre grupos adimensionales.

Modelos fuente



Formulaciones matemáticas planteadas para determinar la tasa de emisión de una sustancia desde la fuente.

Estabilidad atmosférica

Corresponde a la condición atmosférica en la cual la dispersión de los gases es menor por baja radiación solar, nubosidad alta y baja velocidad del viento.

Emisión

Liberación de una sustancia desde un contenedor o una superficie hacia la atmósfera.

 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

PRESENTACIÓN

El Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE, es un Establecimiento Público del orden Distrital adscrito a la Secretaría de Gobierno, creado por el Acuerdo del Concejo Distrital No. 11 de 1987 y reorganizado con arreglo al Decreto Distrital 652 de 1990, el cual tenía por finalidades financiar y apoyar administrativamente las actividades que correspondían a la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias – DPAE.

Mediante el Decreto Distrital 413 de 2010 se suprimió de la estructura de la Secretaría Distrital de Gobierno la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias DPAE y se dispuso que las funciones de la misma fueran asignadas y ejercidas por el FOPAE. Por lo tanto, son ahora funciones del FOPAE, las actividades de liderar el desarrollo de políticas e integrar las acciones de prevención de riesgos y atención de desastres de las diferentes entidades que conforman el Sistema Distrital de Prevención y Atención de Emergencias (SDPAE).

Por consiguiente, resulta satisfactorio para el FOPAE poner a disposición de la comunidad en general este documento, el cual constituye el referente técnico para el análisis de riesgos y consecuencias, como producto de efectos tóxicos por dispersión de gases más densos que el aire (Nube tóxica).

INTRODUCCIÓN

El documento *Análisis de riesgos y consecuencias: efectos tóxicos por dispersión de gases más densos que el aire (nube tóxica)* es una herramienta de consulta y orientación, conceptual y metodológica, para facilitar los procesos de modelaje y simulación de efectos por dispersión de nubes tóxicas en actividades industriales de alto riesgo. Está concebida con el propósito de brindar al industrial los aspectos pertinentes para la evaluación de escenarios de liberación y dispersión de gases tóxicos más densos que el aire.

Éste constituye un instrumento de consulta que orienta técnicamente, mediante modelos internacionalmente reconocidos, los procesos de modelaje y simulación que deben realizar los industriales y propietarios de establecimientos que localizan sus actividades en el Distrito Capital y su área de influencia.

La dispersión de una sustancia química de naturaleza tóxica es considerada como el tercer accidente industrial de mayor ocurrencia, luego del fuego y las explosiones (Mannan, 2005). Con el ánimo de facilitar a los usuarios el correcto uso de este documento, es importante mencionar que la Organización Internacional del Trabajo (ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO (OIT), 1993) define este tipo de accidentes como un acontecimiento repentino¹, en el curso de una actividad dentro de una instalación expuesta a riesgos de accidentes mayores, en el que estén implicadas una o varias sustancias peligrosas y que exponga a los trabajadores, a la población o al medio ambiente a un peligro grave, inmediato o diferido.

En el marco particular de este documento se entenderá por nube tóxica, a la dispersión de una sustancia en fase gas o vapor más densa que el aire, como consecuencia de una pérdida de contención.

En el marco de la Gestión Integral del Riesgo, resulta vital que los análisis estén soportados por procesos de modelaje y simulaciones, los cuales permitan estimar la intensidad de los efectos y así, estimar los daños a personas, ambiente e infraestructura (Figura 0.1).

¹ Como una emisión, un incendio o una explosión de gran magnitud.



Figura 0.1. Herramientas y técnicas para el análisis sistemático de riesgo dentro de los procesos de Gestión Integral.

De esta forma, los aspectos contemplados en este documento orientan a los responsables de la prevención de accidentes industriales mayores en la cuantificación de las posibles afectaciones que puedan derivarse de la ocurrencia de eventos que involucren la generación de efectos tóxicos en un establecimiento o industria, resaltando las principales variables que se deben considerar en sus análisis y una selección de métodos. Con estos insumos se brinda una base armonizada de análisis, modelaje y simulación para la presentación de documentos que pueden llegar a ser requeridos por las entidades de inspección, vigilancia y control del Distrito Capital.

Objetivo convenio

Adelantar el Proyecto de Apropiación Pública de Ciencia y Tecnología "Mejoramiento en el Conocimiento en Riesgo Tecnológico-Accidentes Industriales Mayores en el Distrito Capital. Eventos con Nube Tóxica", a través de la cooperación con una universidad que cuente con experiencia, infraestructura y personal especializado sobre el tema de que trata el proyecto.

Estructura del documento

Este Informe está planteado en doce (12) capítulos que permiten al usuario comprender de manera integral la estructura general del Convenio y sus resultados:

- CAPÍTULO 1. MARCO JURÍDICO: CONTEXTO INTERNACIONAL, NACIONAL Y DISTRITAL
- CAPÍTULO 2. ACCIDENTE INDUSTRIAL MAYOR: RETORNO DE EXPERIENCIAS - EVENTOS CON NUBE TÓXICA.
- CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RIESGOS: FUNDAMENTOS
- CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RIESGOS: REPORTE
- CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RIESGOS: ÁREA DE INFLUENCIA DE EFECTOS TÓXICOS POR DISPERSIÓN DE GASES MÁS DENSOS QUE EL AIRE (NUBE TÓXICA)
- CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS
- CAPÍTULO 7. DESARROLLO DE LINEAMIENTOS Y ANÁLISIS DE CASO EN EVENTOS DE DISPERSIÓN DE NUBES TÓXICAS: CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS

CAPÍTULO 8. DESARROLLO DE COMITÉS TÉCNICOS

CAPÍTULO 9. DIVULGACIÓN Y FORTALECIMIENTO TÉCNICO

CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 11. ANEXOS

Anexo A: Herramientas Computacionales

Anexo B: Casos de Estudio

CAPÍTULO 12. BIBLIOGRAFÍA

Los capítulos uno y dos brindan un contexto completo sobre la problemática de análisis de accidente industrial, así como su soporte básico legislativo; mientras que los capítulos tres a cinco, presentan las definiciones básicas para el análisis de riesgos, así como la secuencia estructurada para su elaboración y presentación. El capítulo cinco presenta en particular la información recolectada de los modelos seleccionados para el análisis de dispersión de los gases más densos que el aire en el Distrito Capital. Los capítulos seis y siete presentan los algoritmos internacionalmente reconocidos para el cálculo de dispersiones de gases densos, y la estimación de áreas de influencia asociadas a consecuencias específicas por efectos tóxicos, así como los lineamientos para la construcción de escenarios críticos de dispersión. Los capítulos ocho y nueve contienen evidencia del acompañamiento técnico del presente convenio y de sus resultados. En el capítulo diez están contenidas las conclusiones y recomendaciones generales para el uso una herramienta metodológica para el modelado y simulación de la dispersión de gases tóxicos más densos que el aire (objeto de este convenio). En los Anexos se recopilan dos casos ilustrativos y sus memorias de cálculo.

1. MARCO JURÍDICO: CONTEXTO INTERNACIONAL, NACIONAL Y DISTRITAL

La Organización Internacional del Trabajo (OIT) en su 80ª Reunión de la Conferencia General de la Organización Internacional del Trabajo en Ginebra el 22 de junio de 1993 trató los temas relacionados con los accidentes industriales mayores, es así como se adoptó el Convenio 174 sobre la prevención de accidentes industriales mayores (el cual entró en vigor en 1997) y se emitió la Recomendación 181 sobre la prevención de accidentes industriales mayores.

Colombia como miembro de la OIT y firmante del Convenio sobre la Prevención de Accidentes Industriales Mayores (C174) y sus Recomendaciones (R181), viene desarrollando instrumentos normativos y generando acciones mediante sus autoridades designadas como competentes. Es así como se emite en el ámbito nacional la Ley 320 de 1996 por medio de la cual se acogen, entre otros el "Convenio 174 sobre la prevención de accidentes industriales mayores" y la "Recomendación 181 sobre la prevención de accidentes industriales mayores". Adicionalmente el Decreto 2053 de 1999 promulga el "Convenio 174 sobre la prevención de accidentes industriales mayores".

Por otro lado, el marco jurídico para los análisis de riesgo que deben realizar las industrias se encuentra en el Decreto 919 de 1989 "Por el cual se reglamenta el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres de Colombia", el cual establece en el artículo 8º "Análisis de vulnerabilidad":

Para los efectos del Sistema Integrado de Información, todas las entidades públicas o privadas encargadas de la prestación de servicios públicos, que ejecuten obras civiles de gran magnitud o que desarrollen actividades industriales o de cualquier naturaleza que sean peligrosas o de alto riesgo, así como las que específicamente determine la Oficina Nacional para la Atención de Desastres, deberán realizar análisis de vulnerabilidad, que contemplen y determinen la probabilidad de la presentación de desastres en sus áreas de jurisdicción o de influencia, o que puedan ocurrir con ocasión o a causa de sus actividades, y las capacidades y disponibilidades en todos los órdenes para atenderlos.

Y en el artículo 9º *Medidas de protección*: “Todas las entidades a que se refiere el artículo precedente, deberán tomar las medidas de protección aplicables como resultado del análisis de vulnerabilidad. La Oficina Nacional para la Atención de Desastres fijará los plazos y las condiciones mínimas de protección”.



En el ámbito distrital es el Acuerdo 11 de 1987 del Concejo de Bogotá el que crea el Fondo para la Prevención y Atención de Emergencias en el Distrito Especial de Bogotá. Posteriormente en el Decreto 723 de 1999² por el cual se organiza el Sistema Distrital para la Prevención y Atención de Emergencias de Santa Fe de Bogotá, D. C., y se dictan otras disposiciones, señala la necesidad de:

[...] armonizar lo establecido en el Decreto-Ley 919 de 1989 con lo establecido en el Acuerdo 11 de 1987, emanado del Concejo de Bogotá y el Decreto 652 de 1990 que crean el Fondo y la Oficina Coordinadora para la Prevención y Atención de Emergencias, hoy Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de la Secretaría de Gobierno, y le establecen sus funciones, y demás normas que los modifican y adicionan.

El Decreto 332 de 2004, “por medio del cual se organiza el Régimen y el Sistema para la Prevención y Atención de Emergencias en Bogotá Distrito capital y se dictan otras disposiciones”, establece que la coordinación técnica y operativa del Sistema Distrital para la Prevención y Atención de Emergencias estará a cargo de la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias (DPAE), asimismo, en el Artículo 15 “Análisis de riesgos y de medidas de prevención y mitigación”, se establece que: “En desarrollo de lo dispuesto en los Artículos 8º y 9º del Decreto 919 de 1989, las entidades o personas públicas o privadas cuyas actividades puedan dar lugar a riesgos públicos deben hacer análisis de riesgos, de planes de contingencia y de medidas de prevención y mitigación...”.

Por su parte, el Decreto 423 de 2006 adoptó el Plan Distrital para la Prevención y Atención de Emergencias para Bogotá D. C. (PDPAE), por una vigencia de diez años, estableciendo las políticas, objetivos generales, áreas o sectores estratégicos y programas que orientan las acciones de las entidades públicas y de los particulares en la gestión del riesgo público en el Distrito Capital. Adicionalmente, durante el año 2007, se desarrollaron de manera interinstitucional

² Derogado por el Artículo 45 del Decreto Distrital 332 de 2004.

 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. SOBERANO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

las agendas de trabajo del PDPAE en sus escenarios sectoriales y territoriales, en las cuales se identificaron los proyectos, componentes, actividades y responsables, y que fueron adoptadas a través de la Resolución 138 de 2007 de la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias para la debida implementación del Plan.

Finalmente, el Acuerdo 341 de 2008 del Concejo de Bogotá, en el artículo 4º establece que todos los patrones con carácter de empresa y domicilio en la ciudad de Bogotá, deben informar a la DPAE sobre la implementación de sus planes de emergencia, a través del formulario electrónico que para este fin elabore esta entidad, este acuerdo se encuentra disponible en la página web <http://www.sire.gov.co/portal/page/portal/sire/componentes/autoevaluacion> (Sistema de Información para la Gestión de Riesgos y Atención de Emergencias de Bogotá (SIRE), 2006).

2. ACCIDENTE INDUSTRIAL MAYOR: RETORNO DE EXPERIENCIAS - EVENTOS CON NUBE TÓXICA

Con el objetivo de estar cerca de los recursos necesarios para sus actividades, históricamente, las industrias se han instalado cerca de las zonas urbanas. Al mismo tiempo, la fuerza laboral tiende a establecerse en núcleos cercanos a zonas de actividades industriales. Durante el siglo XX el tejido urbano se ha ido sumando a la mayoría de polígonos industriales, generando tensiones entre las actividades enmarcadas en el territorio y el uso del suelo.

Hoy en día la proximidad de la industria y la población incrementa la posibilidad de un accidente industrial con consecuencias catastróficas. El retorno de experiencias internacionales nos alerta sobre este tipo de eventos con casos como el de Feysin (Francia, 1966), Flixborough (Reino Unido, 1974), Seveso (Italia, 1976), Bhopal (India, 1984), Enschede (Holanda, 2000), Toulouse (Francia, 2001), entre otros; lo que ha motivado a diferentes autoridades nacionales a llevar a cabo una toma de conciencia colectiva sobre el desafío que plantea la interacción de la gestión de riesgos industriales y el desarrollo sostenible de territorios.

El análisis histórico de accidentes es una de las técnicas empleadas para identificar los riesgos en una instalación. Se basa en el estudio de accidentes ocurridos en el pasado, en instalaciones similares a las de estudio o en actividades que manejen el mismo producto.

El análisis detallado de la experiencia histórica acumulada en las operaciones de proceso, almacenamiento y transporte, permite extraer conclusiones para el desarrollo de una política adecuada de seguridad para ser utilizadas en la formulación de los escenarios accidentales. Asimismo, permite comprender su mecanismo de ocurrencia, así como la intensidad de sus efectos.

El tercero de los mayores peligros, luego de un incidente con fuego o una explosión es la liberación al ambiente de una sustancia tóxica. El riesgo asociado a una sustancia tóxica depende de las condiciones de exposición y de la sustancia misma. Varía de una exposición momentánea a elevadas concentraciones o por el contrario de largas exposiciones a concentraciones muy bajas.

El retorno de experiencias internacionales pone en evidencia un gran número de eventos con nube tóxica (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Lista ilustrativa de eventos mayores con nube tóxica. Construcción propia a partir de (Mannan, 2005, pp. 18/62, 18/63, 18/64), (Mannan, 2005, p. Anexo A1.2) (RED PROTEGER, 2009) (Universidad Nacional Autónoma de México, 2005).

N°	Fecha	Localización	Unidad/Actividad	Causa	Material	Cantidad (ton)	Muertos (M) Heridos (H)
1	1914	Chrome, NJ, EE.UU.	Vagón para transporte	-	Cloro	7	0
2	1917	Wyandotte, MI, EE.UU.	Tanque de almacenamiento	Ruptura	Cloro	13,6	1M
3	1920	Cataratas del Niágara, NY, EE.UU.	Cilindro	Ruptura de cilindro	Cloro	0,066	3M
4	1925	De Noya, OK, EE.UU.	Cilindro	Escape	Cloro	0,066	1M - 2M
5	13 de diciembre de 1926	St. Auban, Francia.	Tanque de almacenamiento	Sobrellenado	Cloro	25	10M - 40M
6	20 de mayo de 1928	Hamburgo, Alemania	Tanque de almacenamiento	Escape	Fosgeno	10	11M, 171H
7	7 de julio de 1928	Asbokan, NY, EE.UU.	Vehículo 1 ton	Explosión, contaminación con NCI3	Cloro	1	0
8	13 de julio de 1928	Asbokan, NY, EE.UU.	Vehículo 1 ton	Explosión, contaminación con NCI3	Cloro	1	0
9	10 de mayo de 1929	Siracusa, NY, EE.UU.	Tanque de almacenamiento	Explosión de tanque, H ₂ - Cl ₂ , sobrellenado	Cloro	25	1M
10	1930	Lieja (Lüttich), Bélgica	Planta de combustibles	-	Ácido fluorhídrico, dióxido de azufre		63M
11	28 de febrero de 1934	Cataratas del Niágara, NY, EE.UU.	Vagón para transporte	Tren - fallo en seguro	Cloro	16 - 14.5	0
12	13 de marzo de 1935	Griffith, IN, EE.UU.	Vagón para transporte	Tren - fallo en seguro	Cloro	30 - 27,5	0
13	12 de noviembre de 1936	Johnsonburg, PA, EE.UU.	Tubería	Ruptura	Cloro	3	1M
14	24 de diciembre de 1939	Zarnesti, Rumania.	Tanque de almacenamiento	Explosión de tanque por sobrellenado	Cloro	25	60M

N°	Fecha	Localización	Unidad/Actividad	Causa	Material	Cantidad (ton)	Muertos (M) Heridos (H)
15	26 de enero de 1940	Mjodalen, Noruega	Vagón para transporte	Explosión	Cloro	8	3M – 85H
16	1944	Brooklyn, NY, EE.UU.	Transporte de Cilindro	Fuga en el subterráneo (espacio confinado)	Cloro		208H
17	13 de enero de 1947	Natrium, VA, EE.UU.	Cilindro	Explosión de cilindro	Cloro	0,066	2M - 3M
18	4 de febrero de 1947	Chicago, IL, EE.UU.	Vagón para transporte	Tren - Fuga por calor de incendio	Cloro	18 - 16,3	0
19	5 de noviembre de 1947	Rauma, Finlandia.	Tanque de almacenamiento	Explosión de tanque por sobrellenado	Cloro	30	19M
20	1949	Nitro, WV, EE.UU.	Reactor	Explosión	TCDD (TetraCloroDibenzo Dioxina)		228H
21	1 de septiembre de 1949	Freeport, TX, EE.UU.	Tubería	Incendio en intento de soldadura	Cloro	5	
22	1950	Poza Rica, México	Planta	Escape	Ácido sulfhídrico		22M, 320H
23	20 de julio de 1950	Billingham, Reino Unido.	Vagón para transporte		Cloro	2	0
24	4 de abril de 1952	Wilsum, Alemania.	Tanque de almacenamiento	Daño en tanque, sobrellenado	Cloro	15	7M
25	25 de junio de 1954	Montreal, Quebec, Canadá.	Cilindro	Caída accidental de cilindro en bodega de barco a vapor	Cloro	0,066	1M
26	10 de marzo de 1956	Lago Charles, LA, EE.UU.	Tanque de almacenamiento		Cloro	2,7	0
27	16 de abril de 1957	Nitro, WV, EE.UU.	Válvula	Falla mecánica	Cloro		8M
28	19 de octubre de 1957	Runcorn, Reino Unido.	Vagón para transporte		Cloro	2 a 3	0
29	28 de junio de 1959	Meldrim, GA, EE.UU.	Vagón para transporte	Descarrilamiento	Propano	55	23M

N°	Fecha	Localización	Unidad/Actividad	Causa	Material	Cantidad (ton)	Muertos (M) Heridos (H)
30	13 de abril de 1960	-	Embarcación para transporte	Barcaza - Manguera de carga rota	Cloro		1M
31	31 de enero de 1961	La Barre, LA, EE.UU.	Vagón para transporte	Tren - choque de trenes, tanque perforado	Cloro	30 - 27,5	1M 114H
32	23 de febrero de 1961	-	Embarcación para transporte	Barcaza - hundimiento sin fugas	Cloro	0	
33	23 de febrero de 1961	Billingham, Reino Unido.	Tubería		Cloro		0
34	Agosto de 1961	Morganza, LA, EE.UU.	Vagón para transporte	Choque de trenes	Cloro		1M, 17H
35	30 de noviembre de 1962	Cornwall, Ont, Canadá.	Vagón para transporte	Tren - fallo en seguro	Cloro	30 - 27,5	89H
36	6 de marzo de 1963	Amsterdam, Holanda	Planta		TCDD (TetraCloroDibenzo Dioxina)		8M, 14H
37	28 de abril de 1963	Brandtsville, PA, EE.UU.	Vagón para transporte	Tren - Válvula desprendida en descarrilamiento	Cloro	9	
38	9 de agosto de 1963	Filadelfia, PA, EE.UU.	Vagón para transporte	Tren - Línea de carga quebrada durante proceso de llenado	Cloro		430H
39	12 de julio de 1964	Mobile, AL, EE.UU	Tubería	-	Cloro		1M
40	12 de septiembre de 1965	Nr. Baton Rouge, LA, EE.UU.	Embarcación para transporte	Barcaza - Hundimiento durante el huracán Betsy, sin fugas	Cloro	0	
41	4 de enero de 1966	Feyzin, Francia		Incendio	Amoniaco	1000	18M, 83H
42	1966	Domínguez, California, EE.UU	Tubería	Ruptura accidental		0.2	
43	14 de junio de 1966	La Spezia, Italia	Vagón para transporte		Cloro	7	0

N°	Fecha	Localización	Unidad/Actividad	Causa	Material	Cantidad (ton)	Muertos (M) Heridos (H)
44	1967	Bankstown, Australia			Cloro		5H
45	8 de noviembre de 1967	Newton, AL, EE.UU.	Vagón para transporte	Tren - Tanque perforado en descarrilamiento	Cloro	55 - 50	0
46	1968	Bolsover, Reino Unido	Reactor	Reacción de mezcla	TCDD (TetraCloroDibenzo Dioxina)		79H
47	21 de agosto de 1968	Liévin, Francia	Vagón para transporte	Falla mecánica	Amoniaco	20	5M, 20H
48	1969	Cumming, IA, EE.UU.	Vagón para transporte	Descarrilamiento	Amoniaco	a	A
49	18 de febrero de 1969	Crete, NE, EE.UU.	Vagón para transporte	Falla mecánica	Amoniaco	64	9M, 53H
50	8 de mayo de 1969	Cleveland, OH	Vehículo 1 ton	-	Cloro	1	2M
51	21 de enero de 1970	Belle, WV, EE.UU.	Vagón para transporte		Amoniaco		1H
52	28 de julio de 1970	-	Embarcación para transporte	Barcaza - fallo en la bomba de descarga	Cloro		1M
53	19 de octubre de 1970	Javle, Suecia	Tubería		Cloro	2	0
54	16 de noviembre de 1970	Blair, NE, EE.UU.	Tanque de almacenamiento	Fuga	Amoniaco	160	0
55	5 de junio de 1971	Floral, AR, EE.UU.	Tubería	Ruptura	Amoniaco	600	0
56	8 de agosto de 1971	Gretna, FL, EE.UU.	Vehículo transporte	Fallo mecánico	Metilbromuro		4M
57	19 de marzo de 1972	Nr. Louisville, KY, EE.UU.	Embarcación para transporte	Barcaza - Daño, sin fugas	Cloro	0	
58	5 de marzo de 1973	Loos, BC, EE.UU.	Vagón para transporte		Cloro	15,5	0

N°	Fecha	Localización	Unidad/Actividad	Causa	Material	Cantidad (ton)	Muertos (M) Heridos (H)
59	13 de julio de 1973	Potchefstroom, Sur África.	Tanque de almacenamiento		Amoniaco	39	18M, 65H
60	6 de diciembre de 1973	Kansas City, KS, EE.UU.	Tubería		Amoniaco	210	0
61	6 de diciembre de 1973	McPherson, KS, EE.UU.	Tubería	Escape	Amoniaco	230	0
62	6 de febrero de 1974	Omaha, NE, EE.UU.	Evaporador de cloro		Cloro		0
63	26 de abril de 1974	Chicago, IL, EE.UU.	Tanque de almacenamiento		Tetracloruro de sílice		0
64	3 de septiembre de 1975	Texas City, TX, EE.UU.	Tubería		Amoniaco		0
65	14 de diciembre de 1975	Cataratas del Niágara, NY, EE.UU.	Vehículo transporte		Cloro		4M, 80H
66	16 de enero de 1976	Landskrona, Suecia	Terminal de carga		Amoniaco		2M
67	7 de mayo de 1976	Enid, OK, EE.UU.	Tubería		Amoniaco		0
68	11 de mayo de 1976	Houston, TX, EE.UU.	Vehículo transporte	Colisión	Amoniaco	19	6M, 178H
69	10 de julio de 1976	Seveso, Italia	Reactor	Explosión	TCDD (TetraCloroDibenzo Dioxina)		462H
70	2 de septiembre de 1976	Haltern, Alemania	Vagón para transporte		Dióxido de carbono		0
71	26 de septiembre de 1976	Manfredonia, Italia	Columna de absorción		Compuestos de arsénico		30H
72	10 de diciembre de 1976	Baton Rouge, LA, EE.UU.	Recipiente de almacenamiento	Perforación por explosión anexa	Cloro	90	3H

N°	Fecha	Localización	Unidad/Actividad	Causa	Material	Cantidad (ton)	Muertos (M) Heridos (H)
73	1977	México			Amoniaco		2M, 102H
74	2 de febrero de 1977	Baton Rouge, LA, EE.UU.	Trabajos químicos		Cloro		10H
75	9 de noviembre de 1977	Pensacola, FL, EE.UU.	Vagón para transporte		Amoniaco		0
76	10 de diciembre de 1977	Cartagena, Colombia	Planta de producción		Amoniaco		30M, 25H
77	1978	Chicago, IL, EE.UU.	Terminal de carga	Escape	Ácido sulfhídrico		8M, 29H
78	26 de febrero de 1978	Youngstown, FL, EE.UU.	Vagón para transporte	Descarrilamiento	Cloro		8M, 114H
79	15 de abril de 1978	Baltimore, MD, EE.UU.			Óxido de azufre (VI)		100H
80	6 de junio de 1979	Burghausen, Alemania	Planta Química		Ácido sulfhídrico		
81	11 de junio de 1979	Rafnes, Noruega	Planta Química	Explosión	Cloro		
82	18 de julio de 1979	Bayonne, NJ	Vagón para transporte		Cloro		
83	10 de noviembre de 1979	Mississauga, Ont, Canadá	Vagón para transporte	Perforación	Cloro		215000 evacuado
84	8 de octubre de 1980	Ciudad de México, México	Terminal de carga	Fuga	Amoniaco		9M, 28H
85	1981	Zaragoza, España	Planta de tratamiento de agua potable	Fuga de gas licuado	Cloro		164H
86	1981	Montones, México		Explosión	Cloro		29M
87	4 de agosto de 1981	Montana, México	Vagón para transporte	Descarrilamiento	Cloro	110	17M 280H
88	17 de enero de 1982	Río Moselle, Francia	Tubería	Fallo	Monóxido de Carbono		5M

N°	Fecha	Localización	Unidad/Actividad	Causa	Material	Cantidad (ton)	Muertos (M) Heridos (H)
89	3 de abril de 1983	Denver, CO, EE.UU.	Vagón para transporte		Ácido Nítrico		
90	3 de diciembre de 1984	Bhopal, India	Tanque de almacenamiento	Sobrecalentamiento	Metil Isocianato		4000M, 200000H
91	20 de marzo de 1989	Jonova, Lituania	Tanque de almacenamiento	Incendio	Amoniaco	1400	7M
92	24 de marzo de 1992	Senegal	Sobrecalentamiento	Explosión e incendio en tanque de almacenamiento en una planta procesadora de maní.	Amoniaco		41M 403H
93	2 de febrero de 1993	Griesheim, Alemania	Reactor	Reacción de mezcla	Nitroarenas cloradas	11.8	92H
94	21 de enero de 1996	Tarragona, España	Tanque de almacenamiento	Ruptura de tanque	Cloro		12 H
95	18 de septiembre de 1999	Ciudad Juarez, México	Tanque de almacenamiento	Escape	Amoniaco		200H
96	3 de octubre de 2000	Chalco, México	Vehículo transporte	Escape	Amoniaco		240H
97	2002	Nagpur Chawl, India	Instalación del ejercito	Escape	Cloro		40
98	2002	Minot, Dakota del Norte, EE.UU.	Descarrilamiento	Escape	Amoniaco		1M, +60H
99	23 de diciembre de 2003	Chongqing, China	Tubería	Escape	Ácido sulfhídrico		243M, 10000H
100	16 de abril de 2004	Chongqing, China	Tanque de almacenamiento	Escape, sobrecalentamiento, explosión	Cloro	42	9M, 282H
101	2005	Granetiville, Condado de Aiken, estado de South Carolina, EEUU	Choque de trenes	Escape	Cloro		8M, 260H

La liberación de una sustancia tóxica es mucho menos frecuente, comparado con la ocurrencia de una situación con fuego o explosión. Si bien son eventos que registran una baja probabilidad de ocurrencia, su área de influencia de riesgo industrial es muy significativa y pueden llegar a ocasionar efectos tóxicos severos sobre la población en el área de influencia.

La exposición a ciertos materiales puede resultar en el daño temporal o permanente de los órganos del cuerpo, este hecho es conocido como un envenenamiento. En los casos de exposiciones de tipo accidental, es decir, exposiciones de corta duración con altas concentraciones, los efectos sobre la salud suelen ser agudos³ aún cuando algunos efectos pueden ser latentes. Los efectos agudos pueden incluir: irritación de las vías respiratorias, la piel y los ojos; narcosis⁴, asfixia, daño sistémico y muerte.

Los modos de exposición a las sustancias químicas tienen tres posibles vías de ingreso al cuerpo humano: inhalación, ingestión y contacto externo. Los gases, vapores, humos y polvos tienden a ser inhalados. Por su parte los líquidos y sólidos son ingeridos. La entrada de sustancias también puede suceder a través del contacto con las mucosas de los ojos, boca, garganta y tracto urinario.

La respuesta del cuerpo a las sustancias puede ser de tipo inmediato o gradual. Una respuesta gradual se refiere a los síntomas presentados por un individuo, que se hacen progresivamente más graves conforme la dosis aumenta. La respuesta a exposiciones por cloro o amoníaco es gradual y algunos de sus efectos se muestran en la siguiente tabla (Tabla 2.2).

³ Las exposiciones que causan efectos agudos, suelen ser exposiciones únicas, no repetitivas y no superiores a 8 horas (Casal, 2008, p. 272). Además, están asociadas a grandes concentraciones de sustancias que entran en contacto con personas y a respuestas discretas (de ocurrencia única) y no crónicas. La medida para la determinación de los efectos es la Carga Tóxica (TL, por sus siglas en inglés) y para gases es una medida en función de la concentración y el tiempo de exposición. La medida de la Dosis Letal (LD₅₀, por sus siglas en inglés) es útil para exposiciones como las descritas anteriormente en donde se mide la cantidad de material que causa la muerte del 50% de los animales usados para una prueba de toxicidad.

⁴ Disminución de la sensibilidad o alteración reversible de la consciencia debido al uso de narcóticos, intoxicación alcohólica o inhalación de ciertas sustancias como la anestesia.

Tabla 2.2. Efectos por exposición a diferentes concentraciones de gases tóxicos (amoníaco y cloro) Recuperado y Adaptado de (Mannan, 2005, p. 18/8).

Gas	Tipo de concentración	Valor (ppm)	Referencia
Amoníaco	TLV-TWA ⁵	25	ACGIH
	TLV-STEL ⁶	35	
	Concentración detectable por olor	20	Matheson
	Concentración causante de irritación severa de garganta, mucosas nasales y parte alta del tracto respiratorio	400	
	Concentración causante de irritación severa de los ojos	700	
	Concentración causante de tos, espasmos bronquiales, posiblemente fatal por exposición de alrededor de 30 minutos	1700	
	Concentración causante de edema, estrangulamiento, asfixia, fatal casi de inmediato	5000	
Cloro	TLV – TWA ⁵	0,5	ACGIH
	TLV-STEL ⁶	1	
	Concentración mínima detectable por olor	1	Chlorine Code
		3,5	Matheson
	Máxima concentración inhalable por 1 hora sin daño	4	
	Concentración mínima causante de irritación de garganta	15	
	Concentración mínima causante de tos	30	
	Concentración peligrosa por exposición de 30 minutos	40 – 60	
Concentración probablemente fatal para unas cuantas inhalaciones profundas	1000		

⁵ TLV-TWA: Valor Límite Umbral Media Ponderada en el Tiempo (por sus siglas en inglés)

⁶ TLV-STEL: Valor Límite Umbral Límite de exposición a corto plazo (por sus siglas en inglés)

El mayor incidente industrial con cloro ocurrió en Zarnesti, Rumania, donde la falla de un tanque de almacenamiento resultó en la muerte de 60 personas. Por su parte, el mayor accidente relacionado con amoníaco ocurrió en 1992 en Senegal, donde 41 personas murieron por la explosión y posterior incendio de un tanque de almacenamiento de amoníaco en una planta procesadora de maní.

En general, los escapes de amoníaco implican grandes cantidades de sustancia liberada, comparados con aquellos asociados a cloro. Este hecho no quiere decir que los haga menos letales, sabiendo que la toxicidad del amoníaco es menor que la del cloro (Tabla 2.2). A partir del estudio de experiencias, las fallas en los tanques de almacenamiento se han encontrado como una de las principales causas de este tipo de incidentes.

Haciendo uso de la base de datos Aria/Barpi⁷ se puede evidenciar el gran número de eventos que involucran cloro y amoníaco (período 01/01/2004 a 31/12/2009). Se registran cerca de 386 eventos, la mayoría de ellos en pequeñas instalaciones industriales, operaciones de cargues, descargue y transporte. Cerca del 25 % de los casos requirieron confinamiento de la población circundante o evacuación de la misma.

En un contexto distrital, según los datos reportados en el Sistema de Información para la Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá – SIRE, desde el 2003 hasta el 2009, los eventos que involucraron cloro se presentaron en el 2007 y se relacionaron con sistemas de desinfección de piscinas (3 reportes). Sin embargo, es importante resaltar que no existe un buen registro de incidentes o accidentes que involucren esta sustancia en operaciones de producción, cargue, descargue y transporte, debido a que este tipo de eventos son atendidos directamente por el productor y no son objeto de reporte obligatorio al sistema distrital.

Situación similar se presenta con el amoníaco. De acuerdo con lo reportado en el SIRE, desde el 2003 al 2009 se presentaron 16 eventos con este gas de los cuales 9 estuvieron relacionados con sistemas de refrigeración. Es importante añadir que la masificación del uso de este gas como refrigerante en la industria de

⁷ Desde 1992, la oficina del Ministerio encargada del medio ambiente, la Oficina de Análisis de los Riesgos y Contaminaciones Industriales (BARPI) establecida en Lyon (Francia), reúne y difunde los datos sobre el retorno de experiencias en materia de accidentes tecnológicos. Un equipo de ingenieros y técnicos garantiza a tal efecto la recopilación, el análisis, la puesta en forma de los datos y conclusiones obtenidos, así como su registro en la base A.R.I.A. (Análisis, Investigación e Información sobre los Accidentes). Hasta ahora, la base ARIA contabiliza más de 35.155 accidentes o incidentes ocurridos en Francia o en el extranjero.

alimentos y en grandes superficies ha multiplicado el número de posibles fuentes de emisión, hecho que da una relevancia importante para la gestión de riesgo público, dada la posibilidad de afectación de un gran número de personas.

A pesar del poco registro en Colombia de accidentes con estas sustancias, las consecuencias de su materialización pueden ser muy severas y por tanto cobra importancia su estudio.

A nivel internacional existen diversas tecnologías⁸ en las que se desarrollan modelos para el análisis y evaluación de accidentes industriales mayores, que deben ser adaptadas a las condiciones del Distrito Capital, con la óptica de administrador público de riesgo, como apoyo para la toma de decisiones que conlleven a minimizar la ocurrencia de eventos no deseados de origen industrial en la ciudad. Así pues, conociendo la ocurrencia de eventos con nube tóxica, es importante conocer los modelos existentes asociados a este tipo de fenómenos. De esta forma será posible comprender el funcionamiento de las herramientas existentes y además será posible plantear una que se ajuste a las necesidades del Distrito Capital.

⁸ Entendiéndose tecnología como la aplicación de principios científicos al servicio de las necesidades de un sector, o la aplicación del conocimiento científico o ingenieril con el fin de lograr un resultado práctico.

3. ANÁLISIS DE RIESGOS: FUNDAMENTOS

Los análisis detallados de riesgos deben ser realizados para aquellos escenarios definidos como críticos. Esto hace necesario determinar con claridad los establecimientos propensos a sufrir este tipo de eventos, con miras a fortalecer los sistemas de gestión integral del riesgo, mediante la generación un marco metodológico único de análisis y reporte.

3.1 Actividades industriales de alto riesgo

Se definirán como *Actividades Industriales de Alto Riesgo (AIAR)* aquellas relacionadas con la fabricación, empleo y/o almacenamiento de sustancias peligrosas en cantidad importante, tales como: química básica, agroquímicos, farmacéuticos, polímeros, pinturas y pegantes, combustibles, solventes y similares, entre otras (Revista Contacto, 2010).

Este tipo de actividades pueden asociarse con algunas divisiones de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) Rev. 3, sin embargo debe tenerse en cuenta que esta clasificación no permite determinar con exactitud los establecimientos específicos con escenarios probables de accidente industrial mayor; no obstante permite identificar sectores prioritarios y dimensionar los retos institucionales (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Divisiones del CIIU Rev. 3 asociadas a AIAR para Bogotá⁹.

División	Descripción	# Registros CCB (2005)
14	Explotación de minerales no metálicos	No registros
15	Elaboración de productos alimenticios y de bebidas	7546
16	Fabricación de productos de tabaco	2
17	Fabricación de productos textiles	2397
18	Fabricación de prendas de vestir; preparado y teñido de pieles	8723
20	Transformación de la madera y fabricación de productos de madera y corcho, excepto muebles; fabricación de artículos de cestería y espartería	2044
21	Fabricación de papel, cartón y productos de papel y cartón	218
23	Coquización, fabricación de productos de la refinación de petróleo y combustible nuclear	103
24	Fabricación de sustancias y productos químicos	2314
25	Fabricación de productos de caucho y plástico	1822
34	Fabricación de vehículos automotores, remolques y semirremolques	162
60	Transporte por vía terrestre; transporte por tuberías	No registro

3.2 Definiciones básicas para el análisis de riesgos

Se entenderá como un análisis de riesgo industrial mayor únicamente la evaluación y análisis ingenieril por la implantación de una instalación o actividad que hace uso de sustancias o procesos peligrosos que sean susceptibles de generar eventos peligrosos dentro de un territorio que enmarque intereses poblacionales, ambientales o materiales.¹⁰

⁹ Base de datos de la Cámara de Comercio de Bogotá.

¹⁰ Éstos no contemplan, por ejemplo, los efectos antropológicos o socioeconómicos.

La evaluación y calificación de estos aspectos técnicos estarán definidos por:

- La *probabilidad* de ocurrencia de eventos peligrosos (frecuencia).
- La *intensidad* del fenómeno peligroso.
- La *vulnerabilidad* del medio.

Un *fenómeno peligroso* está constituido por la liberación de energía (p. ej. térmica, ondas de sobrepresión) o sustancias (p. ej. gas tóxico), que puedan ocasionar daños a un entorno vulnerable (p. ej. personas, infraestructura sensible).¹¹

A cada *evento peligroso* se le puede asociar una *probabilidad* (frecuencia), una *dinámica* de ocurrencia (lenta o rápida) y uno o varios *efectos* caracterizados por su nivel de *intensidad*. Una vez sea identificado un escenario o escenarios probables de riesgo industrial mayor, es responsabilidad del industrial realizar todo análisis detallado que permita evaluar sus consecuencias; es decir, se hace necesario el modelaje y simulación de este tipo de eventos aun cuando la probabilidad de ocurrencia sea muy baja, considerando la materialización del suceso.

La materialización de un evento como estos acarreará efectos no deseados tales como:

- *Efectos térmicos*: son el producto de una combustión lenta o rápida de una sustancia inflamable o combustible. Este tipo de efecto causa quemaduras a las personas expuestas o destrucción de bienes de interés: patrimoniales o ambientales.
- *Efectos por sobrepresión*: son el resultado de un gradiente de presión provocado por una explosión. Este tipo de energía puede ser producto de un explosivo, una reacción química, una combustión violenta o la descompresión violenta de un gas o vapor comprimido.
- *Efectos tóxicos* son el resultado de una nube o derrame causados por una fuga o la liberación de una sustancia tóxica. Éstos no se encuentran únicamente asociados a una sustancia clasificada como

¹¹ Se entenderá por infraestructura sensible toda aquella instalación que represente interés público (p. ej. espacios con gran afluencia de público, redes o instalaciones de servicios urbanos, instalaciones de seguridad nacional, zonas de interés ambiental).

peligrosa, sino que pueden ser el producto de eventos tales como incendios o reacciones químicas.

El *área de influencia de riesgo industrial* (área de afectación por la ocurrencia del evento) deberá ser determinada por el dueño de la actividad y ésta contemplará la ocurrencia de fenómenos peligrosos y sus *efectos* con intensidades físicas definidas (área de afectación por la ocurrencia del evento).

La estimación del *área de influencia del riesgo industrial* por cada una de las actividades industriales, comprende la evaluación de los niveles de intensidad y sus dinámicas (modelaje y simulación del evento). Estos análisis deben realizarse por cada uno de los eventos peligrosos identificados y catalogados como aquellos que pueden llegar a trascender las fronteras físicas de la actividad o instalaciones. En esta etapa de análisis, no se tomarán en cuenta consideraciones del medio tales como: población, zonas de interés ambiental o infraestructura sensible, ni las vulnerabilidades asociadas a éstas.

La *vulnerabilidad del medio* permite completar la noción de riesgo industrial mayor: el *medio* estará definido por la población, bienes, actividades, elementos del patrimonio cultural o ambiental, amenazados por el *área de influencia de riesgo industrial*. La *vulnerabilidad* estará definida por la sensibilidad de cada uno de los elementos del medio, para los cuales debe definirse la extensión susceptible de daño, o afectación, como producto del fenómeno peligroso (análisis de consecuencias).

4. ANÁLISIS DE RIESGOS: REPORTE

La elaboración y presentación de análisis de riesgos así como los planes de emergencia y contingencia, deben seguir una secuencia clara, sistemática y estructurada, lo que permitirá a los diferentes actores involucrados tener una base común de análisis.

4.1 Estudio técnico

El estudio técnico debe incorporar:

1. Las *áreas de influencia de riesgo industrial*.
2. La cartografía de las *consideraciones del medio* (p. ej. población, elementos de patrimonio ambiental o cultural, e infraestructura sensible).
3. Superposición de la cartografía de las *consideraciones del medio*, por cada *área de influencia de riesgo industrial*.

Estos estudios constituyen el documento técnico de análisis, entre los diferentes actores involucrados para los procesos de concertación, comunicación y planificación.

4.1.1 Las áreas de influencia de riesgo industrial

Los estudios de las *áreas de influencia de riesgo industrial* deben ser realizados por todas las entidades o personas públicas y privadas cuyas actividades puedan dar lugar a riesgos públicos. En el Distrito Capital se establece que los efectos básicos por analizar son tóxicos, térmicos y de sobrepresión; no obstante, las entidades distritales podrán solicitar ampliaciones y aclaraciones que consideren pertinentes.

Es responsabilidad del dueño de la actividad determinar la escala de trabajo que permita generar los mejores elementos de análisis.

4.1.2 La cartografía de las consideraciones del medio

Las *consideraciones del medio* permitirán identificar los elementos del territorio que se tendrán en cuenta. Para el distrito capital se deben considerar: población, zonas de interés ambiental o cultural, infraestructura sensible, construcciones, ocupación del territorio, uso de suelo e infraestructura pública del territorio.

La cartografía de las *consideraciones del medio* estará constituida por una representación espacial de los diferentes elementos, para ello siempre se debe hacer uso de las capas de información generadas por las entidades oficiales, con el fin de unificar la base de análisis.

La autoridad podrá incluir elementos adicionales a los citados si los considera de interés dentro del marco lógico de riesgo público.

4.1.3 Superposición de la cartografía de las consideraciones del medio, por cada área de influencia de riesgo industrial

A partir de los análisis y cartografías de las áreas de influencia de riesgo industrial y la identificación de los elementos del territorio considerables, se generarán mapas de afectación mediante la superposición de la información contemplada en las secciones 4.1.1 y 4.1.2. Estas representaciones permiten visualizar las áreas de afectación del medio por cada uno de los efectos estudiados (Figura 4.1).

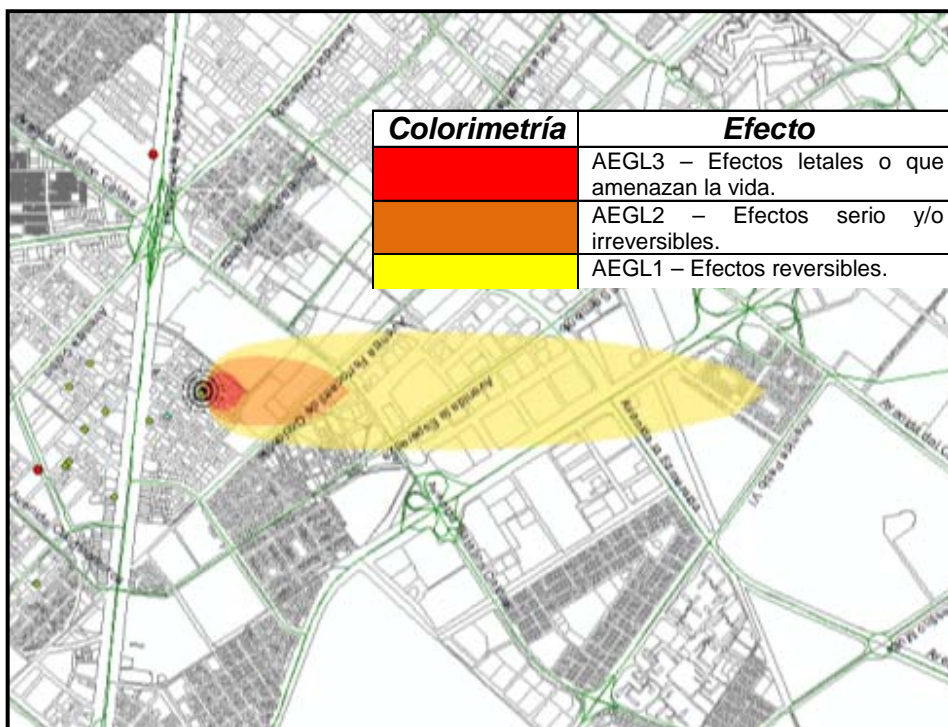




Figura 4.1. Ejemplo de cartografía: área de influencia - exposición a efectos tóxicos por dispersión de nube de gas más denso que el aire sobre infraestructura sensible.

 <p>ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

Este proceso de identificación y análisis debe ser realizado por todas las entidades o personas públicas y privadas cuyas actividades puedan dar lugar a riesgo público.

Las entidades distritales podrán solicitar ampliaciones y aclaraciones que consideren pertinentes. Es responsabilidad del industrial determinar la escala de trabajo que permita generar los mejores elementos de análisis.

5. ANÁLISIS DE RIESGOS: ÁREA DE INFLUENCIA DE EFECTOS TÓXICOS POR DISPERSIÓN DE GASES MÁS DENSOS QUE EL AIRE (NUBE TÓXICA)

Cuando un analista se enfrenta a un proceso de modelaje y simulación de una nube de gas más denso que el aire debe contar con la siguiente información asociada al incidente, ambiente, proceso y la sustancia involucrados:

- | | |
|-----------|--|
| Ambiente | <ul style="list-style-type: none">• Presión atmosférica• Humedad relativa• Temperatura• Velocidad del viento• Altura de la medición de la velocidad del viento• Dirección del viento• Clase de estabilidad atmosférica |
| Proceso | <ul style="list-style-type: none">• Tipo de unidad de proceso (geometría, tamaño)• Accesorio de unidad de proceso• Cantidad de sustancia involucrada (masa o volumen)• Condiciones de operación: temperatura, presión. |
| Sustancia | <ul style="list-style-type: none">• Sustancia involucrada en el proceso• Propiedades físicas |

A partir de esta información, los modelos permiten el cálculo de parámetros de interés, obteniendo así variables como la distancia segura o los perfiles de dispersión de la sustancia de acuerdo a la concentración de interés. De esta forma los modelos se convierten en una herramienta para el análisis de riesgos y para la determinación del área afectada en caso que se presente una fuga de un gas tóxico. Los modelos de dispersión pueden predecir el comportamiento de sustancias químicas en la atmósfera realizando aproximaciones matemáticas que

relacionan variables físicoquímicas o emplean información experimental, convirtiéndose en una herramienta fundamental predictiva. Sin embargo, al aplicar y analizar los resultados obtenidos por los modelos de simulación, es importante considerar sus limitaciones. Existen otras herramientas predictivas, como por ejemplo el análisis de un histórico de eventos; junto a estas herramientas los modelos tienen la ventaja de ser más versátiles y permitir la incorporación de una amplia gama de sustancias.

Al día de hoy existen algunos modelos matemáticos que estudian la dispersión de gases densos (Khan and Abbasi 2000), entre ellos aquellos propuestos por (Ooms 1972), (Eidsvik 1980), (Deaves 1987; Deaves 1992). Uno de los primeros intentos para modelar la dispersión de gases más densos que el aire fue el de (Ooms 1972) quien propuso el modelo de pluma cuya base es un modelo analítico apoyado en el fenómeno de transporte convencional.

Materiales peligrosos que son emitidos a la atmósfera son transportados y diluidos por el viento. Dicho proceso de transporte y dilución para diferentes condiciones y escenarios de dispersión es simulado hoy en día por varios modelos que predicen efectivamente el comportamiento de la sustancia. De estos modelos se obtienen concentraciones (en función del tiempo) en cualquier ubicación alrededor del punto de fuga (C. J. H. van den Bosch 2005).

El escape de gases más densos que el aire presenta ciertos efectos especiales que afectan su dispersión. En estos casos, el material emitido descenderá a la superficie y una vez en el suelo, se esparcirá radialmente bajo la influencia de fuerzas gravitacionales (C. J. H. van den Bosch 2005).

Algunos materiales peligrosos volátiles son más pesados que el aire por una o más de las siguientes razones:

- El peso molecular del compuesto químico es mayor que el del aire. Ejemplos son: LPG (Gas licuado del petróleo por sus siglas en inglés), ciclohexano, freón y cloro.
- El compuesto químico es emitido como un gas frío, o enfriado debido a la evaporación del proceso. Ejemplos son: LNG, amoníaco y fluoruro de hidrógeno.
- En el caso de una emisión flash (formación de vapor debido a cambios de presión), la nube es una mezcla de aerosoles y vapor.

- Ocurren reacciones químicas que son endotérmicas y que pueden, además, ocurrir en presencia de vapor de agua con un alto potencial de captura por parte de estos materiales.

Un aspecto importante de las emisiones es su duración. Dependiendo del tiempo durante el cual la emisión se lleva a cabo, las emisiones se pueden clasificar en dos categorías: instantáneas y continuas (Casal 2008).

Existen diferentes criterios para diferenciar entre una emisión instantánea y una emisión continua. En la Tabla 5.1 se tienen algunos de estos criterios (Casal 2008):

Tabla 5.1. Cuadro en el que se comparan algunos criterios para diferenciar entre emisiones instantáneas y continuas. Construcción propia a partir de (Casal 2008):

Emisión instantánea	Emisión continua
El tiempo requerido para que la nube alcance una ubicación dada es mayor que la duración de la emisión.	La duración de la emisión es mayor que el tiempo requerido por la nube para alcanzar la ubicación dada.
La sustancia se escapa a la atmósfera en menos de un minuto.	La sustancia tarda más de un minuto en escapar a la atmósfera.

En la realidad, la división entre emisiones continuas e instantáneas es arbitraria y relativa. En la práctica las nubes tienen un comportamiento intermedio: la duración de la emisión (t_r) es finita, un estado estacionario se alcanza durante un periodo de tiempo y finalmente la nube se dispersa. El tiempo requerido por la nube para alcanzar un observador que se encuentra a una distancia x en la dirección del viento se puede estimar como:

$$t_x = \frac{x}{u}$$

Ecuación 5.1

Donde u es la velocidad del viento, es decir, se asume que la nube viaja a la misma velocidad del viento. Para estimar si una emisión es continua o instantánea el siguiente criterio cuantitativo fue propuesto (Casal 2008):

Una emisión se considera continua a una distancia x en la dirección del viento si:

$$\frac{ut_r}{x} \geq 2.5$$

Ecuación 5.2

Y la emisión se considera instantánea cuando:

$$\frac{ut_r}{x} \leq 0.6$$

Ecuación 5.3

A continuación se realiza una breve descripción de los modelos para la dispersión de gases más densos que el aire más comunes.

5.1 Modelos para la dispersión de gases más densos que el aire

5.1.1 Modelos de caja

De acuerdo a (C. J. H. van den Bosch 2005), los modelos de caja suponen que la nube de gas denso tiene la forma de un cilindro circular plano, con altura y radio uniformes, y una concentración de gas uniforme en todo el volumen de la nube (Figura 5.1).

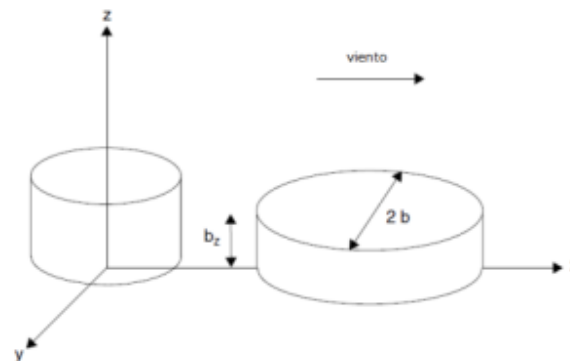


Figura 5.1. Modelo de caja para una nube de gas denso. Adaptado de (C. J. H. van den Bosch 2005).

De acuerdo con (C. J. H. van den Bosch 2005), la concentración media de la nube se determina resolviendo las ecuaciones diferenciales ordinarias para las variables dependientes del tiempo: volumen (V), radio de la nube (r) y posición (x) de la nube. La ecuación describiendo la evolución de $V(t)$ está dada por:

$$\frac{dV}{dt} = \pi r^2 w_{e,t} + 2\pi r b_z w_{e,e} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

En esta ecuación, b_z es la altura de la nube, y $w_{e,t}$ y $w_{e,e}$ son velocidades de arrastre en la superficie superior y el borde de la nube respectivamente. Por otro lado, la ecuación que describe la evolución de $r(t)$ está dada por:

$$\frac{dr}{dt} = C \sqrt{g' b_z} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Donde C es una constante y g' es la gravedad efectiva. Esta ecuación describe la depresión de la gravedad en la fase inicial de dispersión (es decir, el movimiento de la nube inducida por la gravedad).

Sin embargo, los modelos de caja tienen aplicaciones limitadas debido a su simplicidad. Holmes and Morawska (2006) lo aplican a la dispersión de partículas en la atmósfera pero plantean que tras ingresar las condiciones iniciales el modelo simula la formación de contaminantes dentro de la caja sin proveer información respecto a la concentración local de los contaminantes. Por ello, establecen que el modelo de caja no es apropiado para modelar las concentraciones de las partículas en un ambiente local, donde las concentraciones y por tanto la dinámica de las partículas está altamente influenciada por los cambios locales en el viento y las emisiones. Es importante aclarar que, a pesar de que las conclusiones de Holmes and Morawska (2006) aplican a la dispersión de partículas, se puede concluir que debido a las suposiciones realizadas por el modelo su eficiencia computacional puede ser una ventaja pero no será el mejor modelo para predecir la dispersión de gases más densos que el aire.

Por otro lado, (Mohan, Panwar et al., 1995) y (Kunsch and Webber, 2000) utilizan el modelo de caja para desarrollar un modelo de dispersión de gases densos. Respectivamente, modelan un escenario en el que se tiene una emisión en la dirección del viento y un escenario en el que la emisión se da en una pendiente recta. Sin embargo, el estudio de (Kunsch and Webber, 2000) presenta la comparación entre una solución numérica y una solución analítica aproximada que no corresponde a la Ecuación 5.4 y a la Ecuación 5.5 (del presente documento), debido a que el modelo de caja debe aplicar a un canal en pendiente, por lo que las ecuaciones son diferentes a aquellas presentadas anteriormente. Por otro lado, (Mohan, Panwar et al. 1995) presentan el desarrollo, validación conceptual y la eficiencia computacional de los modelos IIT Heavy Gas Models I y II para

emisiones continuas e instantáneas. Concluyen que el modelo de caja predice con buena exactitud las concentraciones de vapor en la dirección del viento, y lo validan tanto para emisiones instantáneas como emisiones continuas de material denso tóxico. Por lo tanto, considerando su eficiencia computacional recomiendan el modelo de caja como una herramienta útil para proveer pautas para medidas de respuesta a emergencias. Por último, (Kunsch and Webber, 2000) concluyen que el modelo de caja no permite un modelado detallado del fenómeno físico que contribuye a la dilución de la nube, pero sí reconoce que existen dos fases de depresión y dos fases asociadas de dilución.

5.1.2 Modelos de pluma

Los modelos de pluma (o modelos Gaussianos) se utilizan para describir la dispersión de gases cuya densidad es similar a la densidad del aire (gases neutros). Por lo tanto, pueden ser utilizados para contaminantes cuyo peso molecular es similar al del aire o para gases densos que están diluidos en la fuente. La mayoría de estas ecuaciones están basadas en la ecuación general propuesta por Pasquill y Gifford (Casal, 2008):

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\partial x}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial x}{\partial z} \right) \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Esta ecuación calcula la variación de la concentración en el tiempo en la dirección del viento (dirección x) como función de las variables en todas las direcciones de un espacio en tres dimensiones: K_x , K_y y K_z son los valores de la difusividad en las tres direcciones.

Los modelos Gaussianos tienen base en las siguientes suposiciones:

- El flujo másico de la emisión es continuo en el tiempo.
- El material no se pierde de la pluma como resultado de una reacción química: toda la masa emitida de la fuente se mantiene en la atmósfera.
- No hay efectos gravitacionales en el material emitido.
- Las condiciones meteorológicas son constantes en el tiempo.
- La rugosidad del suelo es uniforme en el área de dispersión. Adicionalmente, no hay obstáculos y el suelo es horizontal.
- La nube se transporta por el viento. Los perfiles de concentración promediados en el tiempo en la dirección perpendicular al viento, tanto

vertical como horizontal, pueden ser representados por una distribución normal.

5.1.2.1 Emisión continua

Un sistema de coordenadas con tres ejes ortogonales se suele utilizar para especificar la concentración (Figura 5.2). El origen del sistema se ubica a nivel del suelo en la posición de la fuente. El eje x se orienta en la dirección del viento, el eje y es perpendicular al viento y horizontal, y el eje z es el eje vertical.

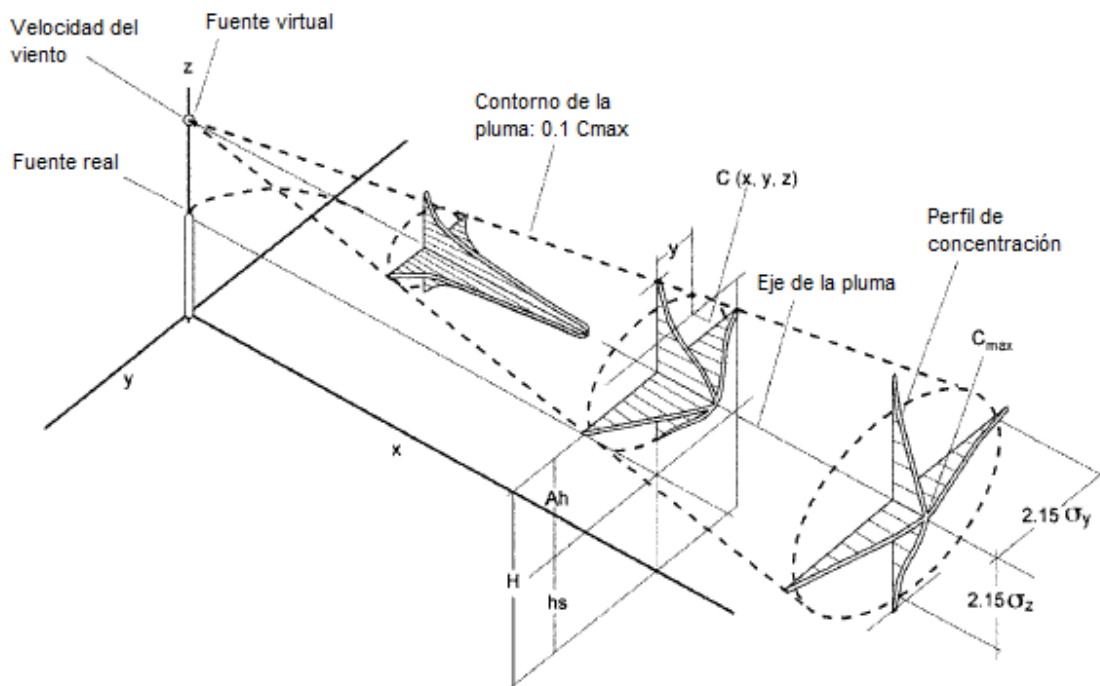


Figura 5.2. Distribuciones Gaussianas horizontales y verticales para la concentración de un tóxico. Adaptado de (Casal, 2008).

Teniendo en cuenta este eje de coordenadas, la siguiente ecuación permite calcular la concentración en una posición (x, y, z) , resultando de una emisión que se da a una altura H sobre el nivel del suelo:

$$c(x, y, z, H) = \frac{m}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left(e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Donde m es el flujo másico de la emisión (kg/s). Los valores σ_y y σ_z son coeficientes de dispersión (o coeficientes de dispersión de Pasquill-Gifford). Éstos se calculan como funciones de la distancia en la dirección del viento del punto de emisión y de las condiciones atmosféricas. Pueden ser calculados por las ecuaciones que se tienen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Ecuaciones para calcular los coeficientes de dispersión para una emisión continua. Adaptado de (Casal 2008).

Clase de estabilidad de Pasquill	σ_y (m)	σ_z (m)
Condiciones rurales		
A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.20x$
B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-0.5}$
D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-0.5}$
E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.016x(1 + 0.0003x)^{-1}$
Condiciones urbanas		
A-B	$0.32x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.24x(1 + 0.0001x)^{+0.5}$
C	$0.22x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.20x$
D	$0.16x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.14x(1 + 0.0003x)^{-0.5}$
E-F	$0.11x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.08x(1 + 0.0015x)^{-0.5}$

Es importante notar que hay una diferencia entre condiciones rurales y condiciones urbanas. En condiciones urbanas, existe una mayor turbulencia debido a la presencia de edificios y a una mayor temperatura. En una zona urbana, la pluma se dispersará más rápidamente que en una zona rural. Por lo tanto, se tienen coeficientes de dispersión distintos para cada tipo de condición de terreno.

La ecuación general se puede simplificar para algunos casos. Para determinar la concentración al nivel del suelo se tiene que $z = 0$ y se obtiene:

$$c(x, y, 0, H) = \frac{m}{\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}} \quad \text{Ecuación 5.8}$$

De igual manera, si se desea calcular la concentración al nivel del suelo y en la línea central de la pluma:

$$c(x, 0, 0, H) = \frac{m}{\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}} \quad \text{Ecuación 5.9}$$

5.1.3 Modelo SLAB ¹²

En la Figura 5.3 se tiene el diagrama de flujo del modelo computacional SLAB. Existen tres etapas principales en una simulación típica: la identificación de la fuente e inicialización para la dispersión, el cálculo de la dispersión de la nube y el cálculo de la concentración promediada en el tiempo. En SLAB existen dos modos de dispersión atmosférica, el modo de pluma en estado estable y el modo de puff en estado transitorio.

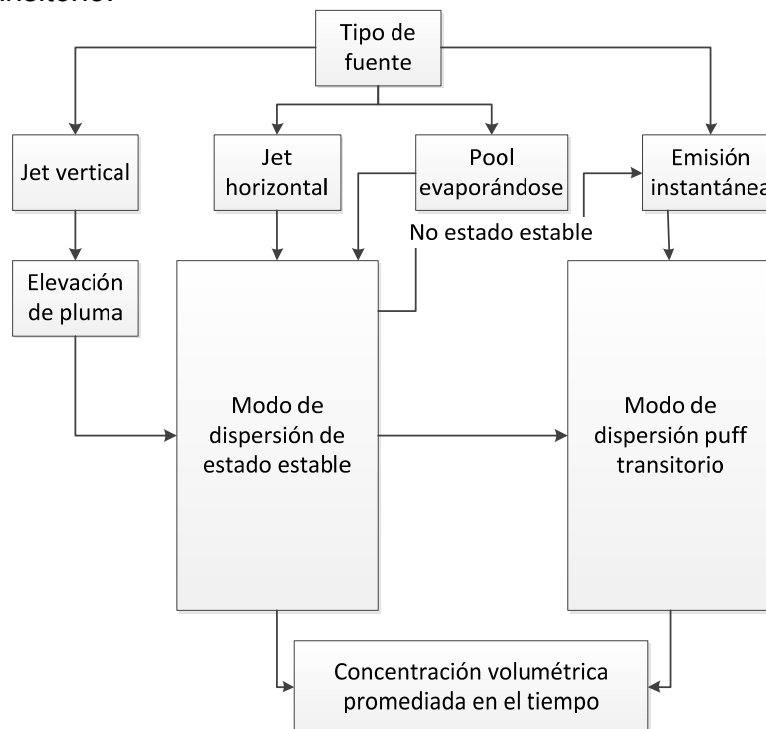


Figura 5.3. Diagrama de flujo del modelo SLAB. Adaptado de (Ermak, 1990).

¹² **Nota:** SLAB es un modelo de dispersión para emisiones más densas que el aire desarrollado por Lawrence Livermore National Laboratory, con el soporte de U.S. DOE, USAF Engineering and Services Center, y el American Petroleum Institute. El código numérico desarrollado en Fortran puede ser descargado GRATIS y debido a restricciones por derechos de autor no puede ser vendido como un producto comercial.

Como se puede observar el modelo SLAB soporta cuatro tipos de fuente: el jet vertical, el jet horizontal, el pool evaporándose y la emisión instantánea o de corta duración. En el caso del jet vertical se realiza primero el cálculo de la elevación de la pluma para encontrar la altura máxima a la que llega la pluma y empezar allí los cálculos en modo de dispersión en estado estable. A partir de allí el procedimiento es el mismo para el jet vertical, jet horizontal y pool evaporándose: se realizan los cálculos en modo de dispersión en estado estable. Sin embargo, toda emisión tiene una duración finita. Al terminar esta duración, t_{sd} , SLAB automáticamente cambia el modo de cálculo a un modo de puff en estado transitorio hasta terminar los cálculos.

Por otro lado, para las emisiones instantáneas o de corta duración, todo el cálculo de dispersión se lleva a cabo en modo de puff en estado transitorio.

Al terminar estos cálculos en cualquiera de los dos modos se obtienen las propiedades instantáneas de la nube promediadas en el espacio. Sin embargo, la variación tridimensional de la distribución de concentración de la nube se obtiene aplicando funciones de perfil que son basadas en el cálculo de las dimensiones de la nube. El cálculo de la concentración promediada en el tiempo se lleva a cabo en dos etapas. Primero, se calcula el ancho efectivo de la nube, incluyendo el aumento debido al serpenteo de la nube. La cantidad que aumenta el ancho de la nube depende de: la duración del tiempo para promediar la concentración, la duración de la emisión y el ancho instantáneo de la nube. En este caso, el tiempo para promediar la concentración es el tiempo adecuado para el estándar de seguridad de interés. Por ejemplo, si se está interesado en una concentración media de 100 ppm para una exposición de 1 hora, este tiempo es igual a 3600 s. La segunda etapa es, después de obtener el ancho efectivo de la nube, calcular la concentración promediada en el tiempo a partir de la "nueva" distribución de concentración, la cual incluye el efecto del serpenteo de la nube.

5.1.3.1 Ecuaciones de dispersión

a. Modo de pluma en estado estable

El modo de pluma en estado estable se basa en las ecuaciones de conservación de masa, momento, energía y especie y utiliza el concepto del arrastre el aire para tener en cuenta la mezcla turbulenta de la nube de gas con la atmósfera que la rodea (Figura 5.4). Las ecuaciones de una dispersión tipo pluma se muestran en la Tabla 5.3 (Ermak, 1990).

Tabla 5.3. Ecuaciones de conservación en el modo de dispersión de pluma en estado estable. Adaptado de (Ermak, 1990).

Conservación de especie	$\frac{d(\rho UBhm)}{dx} = \rho_s W_s B_s$	Ecuación 5.10
Conservación de masa	$\frac{d(\rho UBh)}{dx} = \rho_a (V_e h + W_e B) + \rho_s W_s B_s$	Ecuación 5.11
Conservación de energía	$\frac{d(\rho UBh C_p T)}{dx} = \rho_a (V_e h + W_e B) C_{pa} T_a + \rho_s W_s B_s C_{ps} T_s + f_{pc} + f_t$	Ecuación 5.12
Conservación de momento en x	$\frac{d(\rho U^2 Bh)}{dx} = -0.5 \alpha_g g \frac{d[(\rho - \rho_a) Bh^2]}{dx} + \rho_a (V_e h + W_e B) U_a + f_u$	Ecuación 5.13
Conservación de momento en y <i>Nube en el suelo</i> <i>Nube elevada</i>	$\frac{d(\rho UBh V_g)}{dx} = g(\rho - \rho_a) h^2 + f_{vg}$ $V_g = 0$	Ecuación 5.14
Conservación de momento en z <i>Nube en el suelo</i> <i>Nube elevada</i>	$\frac{d(\rho UBh W_c)}{dx} = -g(\rho - \rho_a) Bh + f_w$ $W_c = -\frac{V_g Z_c}{B}$	Ecuación 5.15
Ecuación de la mitad del ancho de la nube	$U \frac{dB}{dx} = \frac{\rho_a}{\rho} V_e + V_g$ $U \frac{db}{dx} = V_g \frac{b}{B}$	Ecuación 5.16
Ecuación del Parámetro de altura	$U \frac{dZ_c}{dx} = W_c$	Ecuación 5.17

Adicionalmente, SLAB realiza los cálculos con la siguiente ecuación de estado:

$$\rho = \rho_a \frac{T_a}{\alpha T + \gamma T_a} \quad \text{Ecuación 5.18}$$

En donde:

$$\alpha = M_{ae} \left(\frac{m_{da}}{M_a} + \frac{m_{wv}}{M_w} + \frac{m_{ev}}{M_s} \right) \quad \text{Ecuación 5.19}$$

$$\frac{1}{M_{ae}} = \frac{1 - m_{wa}}{M_a} + \frac{m_{wa}}{M_a} \quad \text{Ecuación 5.20}$$

$$\gamma = \frac{\rho_a}{\rho_{wl}} m_{wd} + \frac{\rho_a}{\rho_{sl}} m_{ed} \quad \text{Ecuación 5.21}$$

$$P_a = \frac{\rho_a R_c T_a}{M_{ae}} \quad \text{Ecuación 5.22}$$

En la Tabla 5.3, las primeras seis son ecuaciones de conservación donde x es la distancia en la dirección del viento, ρ es la densidad de la nube, U es la velocidad de la nube en la dirección del viento, B y h son la mitad del ancho de la nube y la altura respectivamente, m es la concentración de masa en la nube, C_p es el calor específico, T es la temperatura de la nube, f_{pc} es la energía de cambio de fase, f_t es el flujo del calor del suelo, V_g es la velocidad de flujo gravitacional de viento cruzado horizontal y f_u y f_{vg} son los términos de fricción en la dirección del viento y de viento cruzado respectivamente. La distinción entre la nube en el suelo y la nube elevada se realiza a continuación y es función de la altura de la nube h y del parámetro de altura Z_c . Las velocidades de arrastre horizontal y vertical son V_e y W_e respectivamente.

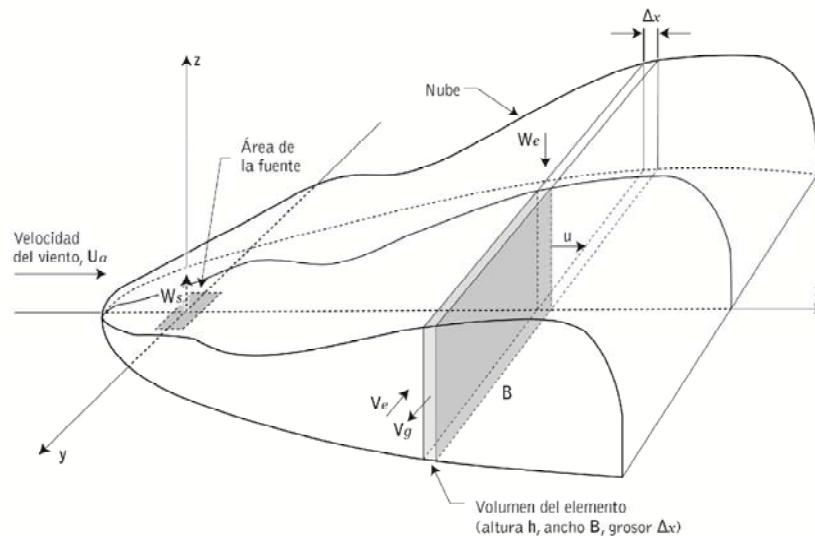


Figura 5.4. Dispersión tipo pluma
Fuente: (Ermak, 1990).

También se tienen las ecuaciones de la estructura de la nube donde B es la mitad del ancho de la nube, b es el parámetro de la mitad del ancho de la nube y Z_c es el parámetro de la altura de la nube. Estas ecuaciones no son esenciales para la solución de las ecuaciones de conservación pero si permiten describir la forma de la concentración volumétrica en tres dimensiones.

Las últimas ecuaciones están asociadas a la Ley del Gas Ideal para un sistema de tres especies (aire seco, agua y la fuente de la emisión) con la posibilidad de que dos especies (agua y la fuente de la emisión) existan como vapor o como gotas de líquido. Los parámetros ρ_a , T_a y P_a son la densidad del aire del ambiente, la temperatura del ambiente y la presión ambiental respectivamente.

La solución de estas ecuaciones resulta en las propiedades de la nube promediadas en el espacio (ρ , m , T , U , etc.) y los parámetros describiendo la forma de la nube.

La distribución volumétrica de concentración en tres dimensiones $C(x, y, z)$ se obtiene suponiendo el siguiente perfil:

$$C(x, y, z) = 2BhC(x)C_1(y, b, \beta)C_2(z, Z_c, \sigma) \quad \text{Ecuación 5.23}$$

Donde:

$$C_1(y, b, \beta) = \frac{1}{4b} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y+b}{\sqrt{2}\beta} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y-b}{\sqrt{2}\beta} \right) \right] \quad \text{Ecuación 5.24}$$

$$B^2 = b^2 + 3\beta^2 \quad \text{Ecuación 5.25}$$

$$C_2(z, Z_c, \sigma) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{\sigma} \left[e^{-\frac{(z-Z_c)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(z+Z_c)^2}{2\sigma^2}} \right] \quad \text{Ecuación 5.26}$$

Donde para la nube elevada ($Z_c > h/2$):

$$\sigma^2 = \frac{h^2}{12} \quad \text{Ecuación 5.27}$$

Y para la nube en el suelo ($Z_c \leq h/2$):

$$\sigma^2 = \frac{(h - Z_c)^2}{3} \quad \text{Ecuación 5.28}$$

b. Modo de puff en estado transitorio

En el modo de puff en estado transitorio, las ecuaciones de SLAB se basan de nuevo en las ecuaciones de conservación de masa, momento, energía y especie. En esta forma de las ecuaciones de conservación, la nube se trata como un puff y

la variable independiente es el tiempo de recorrido, t , del centro de masa del puff. Estas ecuaciones se muestran en la Tabla 5.4 (Ermak, 1990).

Tabla 5.4. Ecuaciones de conservación en el modo de dispersión de pluma en estado estable. Adaptado de (Ermak 1990).

Conservación de especie	$\frac{d(\rho B_x B_y h m)}{dt} = \rho_s W_s B_s^2$	Ecuación 5.29
Conservación de masa	$\frac{d(\rho B_x B_y h)}{dt} = \rho_a [(V_{ex} B_y + V_{ey} B_x) h + W_e B_x B_y] + \rho_s W_s B_s^2$	Ecuación 5.30
Conservación de energía	$\frac{d(\rho B_x B_y h C_p T)}{dt} = \rho_a [(V_{ex} B_y + V_{ey} B_x) h + W_e B_y] C_{pa} T_a + \rho_s W_s B_s^2 C_{ps} T_s + B_x (f_{pc} + f_t)$	Ecuación 5.31
Conservación de momento en x (translación)	$\frac{d(\rho B_x B_y h U)}{dt} = \rho_a [(V_{ex} B_y + V_{ey} B_x) h + W_e B_x B_y] U_a + B_x f_u$	Ecuación 5.32
Conservación de momento en x (flujo de gravedad) <i>Nube en el suelo</i> <i>Nube elevada</i>	$\frac{d(\rho B_x B_y h U_g)}{dt} = g(\rho - \rho_a) h^2 B_x + B_x f_{vg}$ $U_g = 0$	Ecuación 5.33
Conservación de momento en y <i>Nube en el suelo</i> <i>Nube elevada</i>	$\frac{d(\rho B_x B_y h V_g)}{dt} = g(\rho - \rho_a) h^2 B_y + B_x f_{vg}$ $V_g = 0$	Ecuación 5.34

<p>Conservación de momento en z</p> <p><i>Nube en el suelo</i></p> <p><i>Nube elevada</i></p>	$\frac{d(\rho B_x B_y h W_c)}{dt} = -g(\rho - \rho_a) h B_x B_y + B_x f_w$ $W_c = -\left(\frac{V_g}{B_y} - \frac{U_g}{B_x}\right) Z_c$	<p>Ecuación 5.35</p>
<p>Ecuación del centro de masa</p>	$\frac{dX_c}{dt} = U - \frac{\rho_s W_s B_s^2 X_c}{\rho B_x B_y h}$	<p>Ecuación 5.36</p>
<p>Ecuación del ancho medio de la nube</p>	$\frac{dB_y}{dt} = \frac{\rho_a}{\rho} V_{ey} + V_g$ $\frac{db_y}{dt} = V_g \frac{b_y}{B_y}$	<p>Ecuación 5.37</p>
<p>Ecuación de la longitud Media de la nube</p>	$\frac{dB_x}{dt} = \frac{\rho_a}{\rho} V_{ex} + U_g$ $\frac{db_x}{dt} = U_g \frac{b_x}{B_x}$	<p>Ecuación 5.38</p>

Aquí V_{ex} y V_{ey} son las velocidades de arrastre horizontales en la dirección del viento y de viento cruzado respectivamente (Figura 5.5). Los parámetros restantes ya fueron definidos a partir de las ecuaciones planteadas en la Tabla 5.3. Estas ecuaciones son análogas a las de la pluma y se resuelven de una manera similar junto con la ecuación de estado.

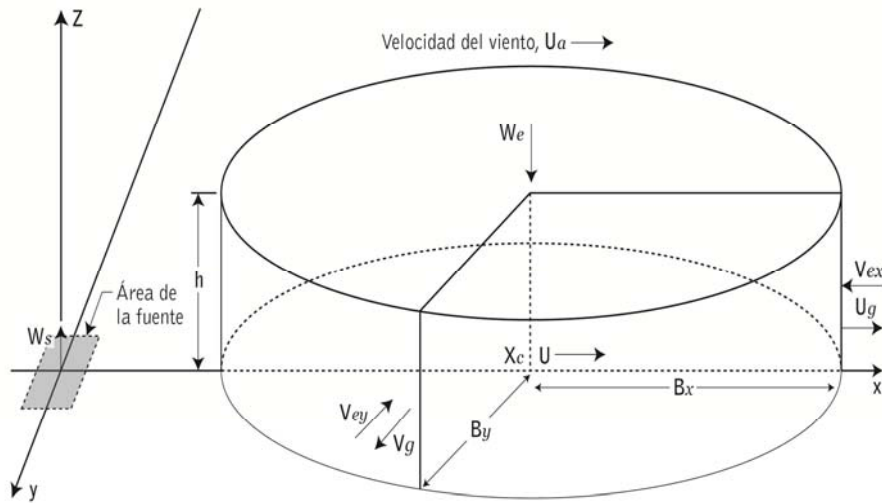


Figura 5.5. Dimensiones del puff.

En este caso, la concentración volumétrica en tres dimensiones depende del tiempo y se calcula mediante:

$$C(x, y, z, t) = 4B_x B_y h C(t) C_1(x - X_c, b_x, \beta_x) C_1(y, b_y, \beta_y) C_2(z, Z_c, \sigma) \quad \text{Ecuación 5.39}$$

5.1.3.2 Submodelos de dispersión

a. Perfil de la velocidad del ambiente

El perfil de la velocidad del viento del ambiente se deriva suponiendo el siguiente gradiente (Ermak, 1990):

$$\frac{dU_a}{dz} = \frac{U_{a*}}{kz} \varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) g\left(\frac{z}{H}\right) \quad \text{Ecuación 5.40}$$

Donde U_a es la velocidad del viento del ambiente, U_{a*} es la velocidad de fricción del ambiente, $k = 0.41$ es la constante de Von Karman, z es la altura sobre el nivel del suelo, L es la longitud de Monin-Obukhov, H es la altura de la capa de mezcla, φ_m es el momento de la función de Monin-Obukhov y $g(z/H)$ es la función de la capa de mezcla. Esta relación está dada por:

$$g\left(\frac{z}{H}\right) = 1 - \frac{z}{H} \quad \text{Ecuación 5.41}$$

Donde H es una función que depende de las clases de estabilidad atmosférica de Pasquill y está dada por:

$$H = H(s) = 130(2^{7-s}) \quad \text{Ecuación 5.42}$$

Donde s es un parámetro que corresponde a las clases de estabilidad atmosférica de la siguiente manera: si la clase es A, $s = 1$; si la clase es B, $s = 2$; y así hasta la clase F donde $s = 6$. El momento de la función de Monin-Obukhov depende de las condiciones atmosféricas. Para condiciones estables ($s > 4$):

$$\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) = 1 + 5L^{-1} \frac{z}{1 + z/z_L(s)} \quad \text{Ecuación 5.43}$$

De esta manera se obtiene (Ermak 1990):

$$U_a(z) = \frac{U_{a*}}{k} \left\{ \ln \frac{z}{z_0} - \frac{z - z_0}{H} + 5L^{-1} z_L \left[\left(1 + \frac{z_L}{H}\right) \ln \left(\frac{z + z_L}{z_0 + z_L}\right) - \frac{z - z_0}{H} \right] \right\} \quad \text{Ecuación 5.44}$$

Donde z_0 es la longitud de la rugosidad del suelo y z_L es el parámetro de estabilidad para $s \geq 4$ y está dado por:

$$z_L(s) = 1 + 0.8(s - 4) \quad \text{Ecuación 5.45}$$

Para condiciones inestables ($s < 4$):

$$\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \varphi_{m\infty} + \frac{1 - \varphi_{m\infty}}{(1 + \tau z)^{1/2}} \quad \text{Ecuación 5.46}$$

$$\varphi_{m\infty} = \frac{1}{(1 - 16z_L L^{-1})^{1/4}} \quad \text{Ecuación 5.47}$$

$$\tau = -\frac{8L^{-1}}{1 - \varphi_{m\infty}} \quad \text{Ecuación 5.48}$$

$$z_L(s) = e^{3.2 - 0.8s} \quad \text{Ecuación 5.49}$$

A partir de estas ecuaciones se obtiene:

$$U_a(z) = \frac{U_{a*}}{k} \left\{ \ln \frac{z}{z_0} - \varphi_{m\infty} \frac{z - z_0}{H} - 2(1 - \varphi_{m\infty}) \left[\ln \left(\frac{1+x}{1+x_0} \right) - \frac{x^{1/2} - x_0^{1/2}}{\tau H} \right] \right\} \quad \text{Ecuación 5.50}$$

Donde:

$$x = (1 + \tau z)^{1/2} \quad \text{Ecuación 5.51}$$

$$x_0 = (1 + \tau z_0)^{1/2} \quad \text{Ecuación 5.52}$$

Estos perfiles de velocidad se utilizan para calcular la velocidad del viento del ambiente promedio \bar{U}_a la cual se define de la siguiente manera:

$$\bar{U}_a = \frac{1}{h} \int_0^h U_a(z) dz \quad \text{Ecuación 5.53}$$

Donde h es la altura de la nube. Estos perfiles de velocidad no son apropiados para alturas pequeñas cuando $z < z_0$. Por lo tanto, cuando $z < ez_0 = 2.72z_0$, el perfil de velocidad se calcula de la siguiente manera:

$$U_a(z) = c_1 z + c_2 z^2 \quad \text{Ecuación 5.54}$$

Donde c_1 y c_2 son constantes tales que $U_a(2.72z_0)$ y $U_a'(2.72z_0)$ son iguales a las fórmulas ya obtenidas del perfil de la velocidad del viento. De esta manera, $U_a(z)$ y su primera derivada es continuo para todo z .

b. Velocidad de arrastre

Las tasas de arrastre vertical incluyen efectos de la fricción de la superficie, movimiento diferencial entre el aire y la nube, la convección termal debido al calentamiento del suelo y la humedad de la mezcla aire-nube. De esta manera, la tasa de arrastre vertical se define como (Ermak 1990):

$$W_e = \frac{1.5\sqrt{3}kU_{e*}g(h/H)}{\varphi_h(h/L)} \quad \text{Ecuación 5.55}$$

Donde $k = 0.41$ es una constante, U_{e*} es la velocidad de fricción efectiva definida por:

$$U_{e*} = \frac{U_r}{U_a(h)} U_* \quad \text{Ecuación 5.56}$$

Donde U_* se define como la velocidad del viento del ambiente a una altura de 4 m. La función de Monin-Obukhov φ_h se define para condiciones estables ($L \geq 0$) como:

$$\varphi_h(h/L) = 1 + 5h/L \quad \text{Ecuación 5.57}$$

Y para condiciones inestables ($L < 0$) como:

$$\varphi_h(h/L) = \frac{1}{(1 - 16h/L)^{1/2}} \quad \text{Ecuación 5.58}$$

Donde la longitud de Monin-Obukhov está dada por:

$$L^{-1} = \frac{L_a^{-1} U_{a*}^2 - 0.025g(\rho - \rho_a)/\rho}{U_*^2} \quad \text{Ecuación 5.59}$$

$$L_a^{-1} = \frac{L_{a0}^{-1}}{1 + h/z_L} \quad \text{Ecuación 5.60}$$

Aquí z_L es una función de la clase de estabilidad definida anteriormente L_{a0} y es la longitud de Monin-Obukhov ambiental a nivel del suelo. La velocidad de fricción ambiental U_{a*} y el valor de la velocidad de fricción dentro de la nube U_* está dado por (Ermak 1990):

$$U_*^2 = U_{mg*}^2 + U_{mh*}^2 + U_{t*}^2 \quad \text{Ecuación 5.61}$$

Donde:

$$U_{mg*}^2 = \left(\frac{U_{a*}}{U_a} \right)^2 (U^2 + 0.25V_g^2) + 0.5W_s U_a \quad \text{Ecuación 5.62}$$

$$U_{mh*}^2 = 0.0195 \left[\delta U^2 + 0.25 \left(\frac{\rho_a}{\rho} \right)^2 V_g^2 \right]$$

Ecuación 5.63

$$U_{t*}^3 = \frac{0.14g(T_a - T) \frac{U_{a*}}{\bar{U}_a} U_{mg*} h}{0.5(T_a + T)}$$

Ecuación 5.64

$$\delta U^2 = \frac{\rho_a}{\rho} (\bar{U}_a - U)$$

Ecuación 5.65

Por otro lado, la velocidad de arrastre horizontal de viento cruzado está dada por:

$$V_{ey} = \sqrt{3}(V_a^2 + V_j^2)^{1/2}$$

Ecuación 5.66

Donde:

$$V_a = \frac{0.08S(L_a)F_a(t)U}{1 + \frac{0.0004B}{0.16\sqrt{3}S(L_a)F_a(t)}}$$

Ecuación 5.67

$$S(L_a) = 1 - \left(\frac{U_{a*}/\bar{U}_a}{0.086} \right)^{1/2} \left(\frac{10}{L_a} \right)$$

Ecuación 5.68

$$S(L_a) = \frac{1}{1 + \left(\frac{U_{a*}/\bar{U}_a}{0.086} \right)^{1/2}} \left(\frac{10}{L_a} \right)$$

Ecuación 5.69

$$F_a(t) = \left[\frac{t + 10e^{-t/10}}{900} \right]^{0.2}$$

Ecuación 5.70

$$V_j = 1.5\sqrt{0.0195k\delta U}$$

Ecuación 5.71

Por último, la velocidad de arrastre horizontal en la dirección del viento está dada por:

$$V_{ex} = \sqrt{3}(V_a^2 + V_s^2)^{1/2}$$

Ecuación 5.72

Donde V_a ya fue definido y V_s está dado por:

$$V_s = 0.6 \frac{U_{a*}}{k} \varphi_m \left(\frac{Z_r}{L_a} \right) g \left(\frac{Z_r}{H} \right) \quad \text{Ecuación 5.73}$$

c. Términos de flujo de calor y momento

El flujo de calor en el suelo está dado por (Ermak, 1990):

$$f_t = \rho B \frac{U_{a*}}{U_a} U_{mg*} C_p (T_a - T) \quad \text{Ecuación 5.74}$$

El flujo de velocidad en la dirección del viento se da gracias a la fricción con el suelo y a la resistencia con el aire en la parte superior de la nube. Se define como (Ermak, 1990):

$$f_u = -\rho B \left\{ \left(\frac{U_{a*}}{U_a} \right)^2 \left[(U - \delta U)^2 - \bar{U}_a^2 \right] + 0.0195 \delta U^2 \right\} \quad \text{Ecuación 5.75}$$

Donde δU ya fue definido en la Ecuación 5.65. El término de velocidad de fricción del ambiente se resta del término de velocidad de fricción de la nube para que f_u sea igual a cero cuando la velocidad promedio de la nube sea igual a la velocidad promedio del viento del ambiente. El flujo de velocidad cruzado también está compuesto por un término de fricción con el suelo y un término de resistencia con el aire en la parte superior de la nube y se define como (Ermak, 1990):

$$f_v = -0.25 \rho B \left[\left(\frac{U_{a*}}{U_a} \right)^2 + 0.0195 \left(\frac{\rho_a}{\rho} \right)^2 \right] V_g^2 \quad \text{Ecuación 5.76}$$

d. Modelo termodinámico

La formación de gotas de líquido y la evaporación se ve gobernada por un modelo de equilibrio termodinámico. Dos especies pueden formar gotas: el vapor de agua en el ambiente que entra a la nube y la emisión liberada dentro de la nube. Las ecuaciones están dadas por:

- La ecuación de conservación de masa del material liberado.
- Ecuaciones de conservación de masa adicionales para el aire seco, agua total y las fracciones de líquido/vapor del agua y de la emisión.
- La ecuación de conservación de energía.
- La ecuación de estado para la mezcla de gotas de líquido-vapor.
- La condición de equilibrio que controla la proporción líquido-vapor para cada especie.

En la Tabla 5.5 se tienen las ecuaciones de conservación de masa para las diferentes especies en el sistema.

Tabla 5.5. Ecuaciones de conservación de especie usadas en el modelo termodinámico. Adaptado de (Ermak 1990).

Agua total	$m_w = (1 - m)m_{wa}$	Ecuación 5.77
Aire seco	$m_{da} = (1 - m)(1 - m_{wa})$	Ecuación 5.78
Vapor de agua	$m_{wv} = m_w + \frac{R_0}{R}(m_{wv0} - m_{w0}) + \delta m_{wpc}$	Ecuación 5.79
Vapor de la emisión	$m_{ev} = m + \frac{R_0}{R}(m_{ev0} - m_0) + \delta m_{epc}$	Ecuación 5.80
Gotas de agua	$m_{wd} = m_w - m_{wv}$	Ecuación 5.81
Gotas de la emisión	$m_{ed} = m - m_{ev}$	Ecuación 5.82

En las ecuaciones anteriores, m_{wa} es el valor de la concentración del vapor de agua en el ambiente. Por otro lado, el subíndice "o" significa el valor de la variable al principio del paso de integración, y δm_{wpc} y δm_{epc} son los incrementos en las concentraciones de masa del agua y del vapor de la emisión debido al cambio de fase en un paso espacial (modo de pluma) o un paso temporal (modo de puff).

En el caso de R , ésta es una variable intermedia que se define como $R = \rho U B h$ para modo de pluma y $R = \rho B_x B_y h$ para puff.

e. Elevación de la pluma

La pluma de un jet vertical primero se eleva hasta alcanzar una altura máxima. En SLAB, la región de la elevación de la pluma se describe utilizando ecuaciones empíricas que se obtienen como resultado de experimentos de campo. Tres tipos de jet se tienen en cuenta: jets más densos que el aire ($\rho_s > \rho_a$), jets con una densidad similar a la del aire ($\rho_s = \rho_a$), y jets que flotan ($\rho_s < \rho_a$).

- *Jet más denso que el aire*

Las ecuaciones que describen la altura máxima alcanzada por el jet h_{pr} , la distancia en la dirección del viento a la que se alcanza esta altura X_{pr} y la concentración volumétrica en la máxima altura C_{pk} están dadas por (Ermak 1990):

$$h_{pr} = 1.32(R_v S_g F_r^2)^{1/3} D_s \quad \text{Ecuación 5.83}$$

$$X_{pr} = \left(\frac{F_r^2}{R_v}\right) D_s = \frac{0.435 h_{pr}^3}{R_v^2 S_g D_s^2} \quad \text{Ecuación 5.84}$$

$$C_{pk} = 1.69 R_v \left(\frac{D_s}{h_{pr}}\right)^{1.85} \quad \text{Ecuación 5.85}$$

Donde:

$$D_s = \frac{4}{\sqrt{\pi}} B_s \quad \text{Ecuación 5.86}$$

$$R_v = \frac{W_s}{U_a} \quad \text{Ecuación 5.87}$$

$$S_g = \frac{\rho_s}{\rho_a} \quad \text{Ecuación 5.88}$$

$$F_r = \frac{W_s}{\left[\frac{g D_s (\rho_s - \rho_a)}{\rho_a}\right]^{1/2}} \quad \text{Ecuación 5.89}$$

Donde B_s es la mitad del ancho de la fuente, W_s es la velocidad de la fuente, U_a es la velocidad del viento del ambiente a la altura de la columna, ρ_s es la densidad de la fuente, ρ_a es la densidad del aire del ambiente y g es la aceleración de la gravedad.

Sin embargo, las ecuaciones de conservación en el modo de pluma se expresan en términos de las propiedades de la nube promediadas, no de sus valores máximos. Por lo tanto, C_{pk} debe ser convertido a un promedio C , y después la masa promedio de viento cruzado m se puede calcular de la siguiente manera:

$$C = \frac{M_a m}{M_s + (M_a - M_s) m} \quad \text{Ecuación 5.90}$$

En el punto máximo alcanzado por la pluma, la velocidad de la pluma se asume que está totalmente en la dirección del viento. Por lo tanto, la velocidad de la nube vertical en el punto máximo se toma como cero. En SLAB, la ecuación de la velocidad en la dirección del viento se deriva de la ecuación de momento de la pluma, resultando:

$$U_{pr} = \frac{U_a}{2(1 - C_{gr})} \left\{ 1 - m - 2C_{gr} + [(1 - m)^2 + 4mC_{gr}]^{1/2} \right\} \quad \text{Ecuación 5.91}$$

Donde:

$$C_{gr} = 0.0585 \left(2 + \frac{X_{pr}}{B_s} \right) \quad \text{Ecuación 5.92}$$

Con el fin de completar la descripción de la nube en el punto máximo alcanzado por la nube, la mitad del ancho de la nube B , la altura h y la altura del centro Z_c deben ser calculadas. La conservación de masa requiere que el área de viento cruzado de la nube sea:

$$A_{pr} = 2B_{pr}h_{pr} = \frac{Q_s}{\rho_{pr}U_{pr}m_{pr}} \quad \text{Ecuación 5.93}$$

Suponiendo que la altura de la pluma es el 60% del ancho de la pluma y que el ancho mínimo es igual al diámetro de la columna, entonces las dimensiones de la pluma en el punto máximo alcanzado son:

$$B_{pr} = \max \left[(A_{pr}/2.4)^{1/2}, B_s \right] \quad \text{Ecuación 5.94}$$

$$h_{pr} = 0.5A_{pr}/B_{pr} \quad \text{Ecuación 5.95}$$

La altura del centro de la pluma es:

$$Z_{cpr} = h_s + h_{pr} \quad \text{Ecuación 5.96}$$

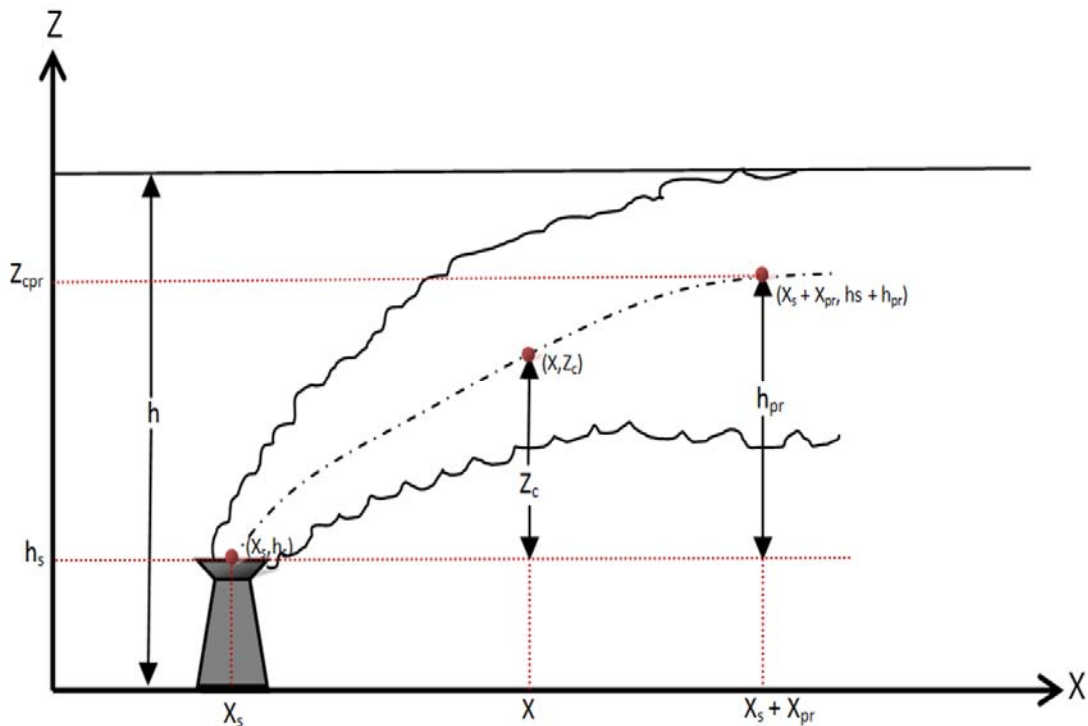


Figura 5.6. Pluma en el punto máximo

Las anteriores ecuaciones definen el estado de la pluma en el punto máximo alcanzado por la pluma. La pluma se asume que sigue un camino elíptico entre el plano xz desde el centro de la columna (x_s, h_s) hasta el punto máximo alcanzado por la columna $(x_s, +X_{pr}, h_s + h_{pr})$ con el centro de la pluma (x, Z_c) dado por:

$$\frac{(x - x_s - X_{pr})^2}{X_{pr}^2} + \frac{(Z_c - h_s)^2}{h_{pr}^2} = 1 \quad \text{Ecuación 5.97}$$

Algunas de las propiedades de la pluma se calculan en la elevación de la pluma interpolando entre dos valores conocidos en la fuente y el punto máximo alcanzado. Más allá de la región de elevación, todas las propiedades de la pluma se calculan resolviendo las ecuaciones de conservación con los valores en el punto máximo alcanzado por la pluma dadas las condiciones iniciales.

- *Jets con densidad similar o menor a la del aire*

Cuando la densidad del material emitido es menor o igual que la densidad del aire del ambiente ($\rho_s \leq \rho_a$), la elevación de la pluma se simula de una manera mucho más simple. En este caso, la fuente del jet vertical se reemplaza con un jet horizontal efectivo ubicado directamente encima del jet vertical a una altura h_{se} dada por:

$$h_{se} = h_s + h_{pr} \quad \text{Ecuación 5.98}$$

En el caso de un jet con densidad igual a la del aire ($\rho_s = \rho_a$), la altura alcanzada por la pluma h_{pr} está dada por:

$$h_{pr} = 0.93 \left(\frac{W_s F_m}{\beta^2 U_a U_{a*}} \right)^{3/7} (h_s + h_{pr})^{1/7} \quad \text{Ecuación 5.99}$$

Donde:

$$F_m = \frac{4}{\pi} W_s B_s^2 \quad \text{Ecuación 5.100}$$

$$\beta = 0.4 + 1.2 \frac{U_a}{W_s} \quad \text{Ecuación 5.101}$$

En el caso de un jet con densidad menor que la del aire ($\rho_s < \rho_a$), h_{pr} está dada por:

$$h_{pr} = 1.2 \left(\frac{F_b}{U_a U_{a*}^2} \right)^{3/5} (h_s + h_{pr})^{2/5} \quad \text{Ecuación 5.102}$$

$$F_b = \frac{4}{\pi} \frac{g(\rho_a - \rho_s) W_s B_s^2}{\rho_a} \quad \text{Ecuación 5.103}$$

En estas ecuaciones, W_s es la velocidad de la fuente, U_a es la velocidad del viento del ambiente a la altura de la columna h_s , U_{a*} es la velocidad de fricción del ambiente, ρ_s es la densidad de la fuente, ρ_a es la densidad del aire del ambiente, g es la aceleración de la gravedad y B_s es la mitad del ancho de la fuente.

5.1.3.3 Concentración promediada en el tiempo

En SLAB, la única propiedad promediada en el tiempo es la concentración volumétrica expresada como una fracción volumétrica desde 0,0 a 1,0. La concentración promediada en el tiempo C_{tav} se determina promediando la concentración volumétrica de la nube $C(x, y, z, t)$ en el tiempo de la siguiente manera:

$$C_{tav} = \frac{1}{t_{av}} \int_{t_{pk} - \frac{1}{2}t_{av}}^{t_{pk} + \frac{1}{2}t_{av}} C(x, y, z, t) dt \quad \text{Ecuación 5.104}$$

Donde t_{pk} es el tiempo de la concentración máxima.

En el modo de pluma en estado estable, el cálculo se puede realizar suponiendo que la concentración aumenta rápidamente hasta alcanzar un valor en estado estacionario, permanece en este valor durante el tiempo de la emisión t_{sd} y después decrece rápidamente a cero. Por lo tanto, la concentración promediada en el tiempo está dada por (Ermak 1990):

$$C_{tav}(x, y, z) = 2BhF_{sw}C(x)C_1(y, b, \beta_c)C_2(z, Z_c, \sigma) \quad \text{Ecuación 5.105}$$

Donde para $t_{sd} < t_{av}$:

$$F_{sw} = \frac{t_{sd}}{t_{av}} \quad \text{Ecuación 5.106}$$

Y para $t_{sd} > t_{av}$

$$F_{sw} = 1 \quad \text{Ecuación 5.107}$$

Por otro lado, el cálculo de la concentración volumétrica promediada en el tiempo para el modo de dispersión de un puff en estado transitorio se calcula integrando sobre la distancia en la dirección del viento x' con el centro de masa de la nube localizado a una distancia $x = X_c(t_{pk})$. Entonces:

$$C_{tav} = \frac{1}{t_{av}U} \int_{X_c - \frac{1}{2}t_{av}U}^{X_c + \frac{1}{2}t_{av}U} C(x', y, z, t_{pk}) dx' \quad \text{Ecuación 5.108}$$

Manipulando esta ecuación se obtiene (Ermak, 1990):

$$\begin{aligned} C_{tav}(x = X_c(t_{pk}), y, z, t_{pk}) \\ = 4B_x B_y h C(t_{pk}) C_3(b_x, \beta_x, t_{av}) C_1(y, b_y, \beta_{yc}) C_2(z, Z_c, \sigma) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 5.109}$$

Donde:

$$C_3(b_x, \beta_x, t_{av}) = \left[\frac{\beta_x}{\sqrt{2}b_x t_{av}U} \right] \left\{ x_1 \operatorname{erf}(x_1) - x_2 \operatorname{erf}(x_2) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} [e^{-x_1^2} - e^{-x_2^2}] \right\} \quad \text{Ecuación 5.110}$$

$$x_1 = \frac{b_x + 0.5t_{av}U}{\sqrt{2}\beta_x} \quad \text{Ecuación 5.111}$$

$$x_2 = \frac{b_x - 0.5t_{av}U}{\sqrt{2}\beta_x} \quad \text{Ecuación 5.112}$$

5.1.4 Modelo de Britter-McQuaid

El modelo de Britter-McQuaid consiste en un juego de correlaciones empíricas basadas en un análisis dimensional y datos experimentales obtenidos de experimentos de campo. El modelo considera la concentración en una nube como función de un conjunto de grupos adimensionales. La estabilidad atmosférica no se tiene en cuenta, ya que su influencia se mostró que es insignificante (Casal 2008). De igual manera, la rugosidad del terreno tampoco se tiene en cuenta. El objetivo principal del modelo es permitir calcular estimados de:

- Los niveles de concentración promedio en el eje de la columna, para emisiones continuas.
- Los niveles de concentración máximos en el camino que toma la nube en la dirección del viento, para emisiones instantáneas.

El modelo de Britter-McQuaid fue descrito inicialmente por (Eisner, 1989) y radica en gráficas que presentan distancias no dimensionales a una serie de niveles de concentración (Duijm, Ott et al. 1996). El modelo original predice únicamente concentraciones a nivel del suelo sobre una línea central.

Para determinar si los efectos de flotabilidad tienen una influencia y si el modelo del gas denso debería ser aplicado, los siguientes criterios fueron propuestos:

Para emisiones continuas

$$\left(\frac{g_0 v_0}{u^3 D}\right)^{1/3} \geq 0.15 \quad \text{Ecuación 5.113}$$

Para emisiones instantáneas

$$\frac{(g_0 V_0)^{1/2}}{uD} \geq 0.20 \quad \text{Ecuación 5.114}$$

Donde u es la velocidad del viento promedio a una altura de 10 m, y g_0 es un término de gravedad corregida, la cual influye en la flotabilidad negativa de la nube:

$$g_0 = \frac{g(\rho - \rho_a)}{\rho_a} \quad \text{Ecuación 5.115}$$

Por otro lado, D es una dimensión característica de la fuente, la cual para emisiones continuas es:

$$D = \left(\frac{v_0}{u}\right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 5.116}$$

Y para emisiones instantáneas es:

$$D = V_0^{1/3} \quad \text{Ecuación 5.117}$$

El modelo de Britter-McQuaid tiene correlaciones para ambas emisiones continuas e instantáneas. A continuación se muestran los pasos a seguir para estimar las distancias seguras de ambos tipos de emisiones.

5.1.4.1 Emisiones continuas

Tras realizar algunas aproximaciones para simplificar el problema, se encontró la siguiente relación (Eisner 1989):

$$\frac{x}{(v_0/u)^{1/2}} = f\left(\frac{g_0^2 v_0}{u^5}\right)^{1/5} \quad \text{Ecuación 5.118}$$

Donde x es la distancia en la dirección del viento a la cual la concentración promedio en el eje de la pluma es c . Utilizando datos experimentales, (Eisner, 1989) obtuvo el gráfico mostrado en la Figura 5.7, la cual representa la anterior ecuación. En esta figura, el área que se encuentra dentro de la línea punteada indica la región en la cual el método está validado con datos experimentales. La línea punteada vertical a la izquierda de la Figura 5.7 indica el límite de una dispersión pasiva (modelo Gaussiano), establecido en $(g_0^2 v_0 u^{-5})^{1/5} = 0.2$. Los valores de concentración obtenidos en esta figura están promediados en el tiempo (aproximadamente 10 min) y debido a fluctuaciones, mayores valores se pueden obtener en tiempos pequeños.

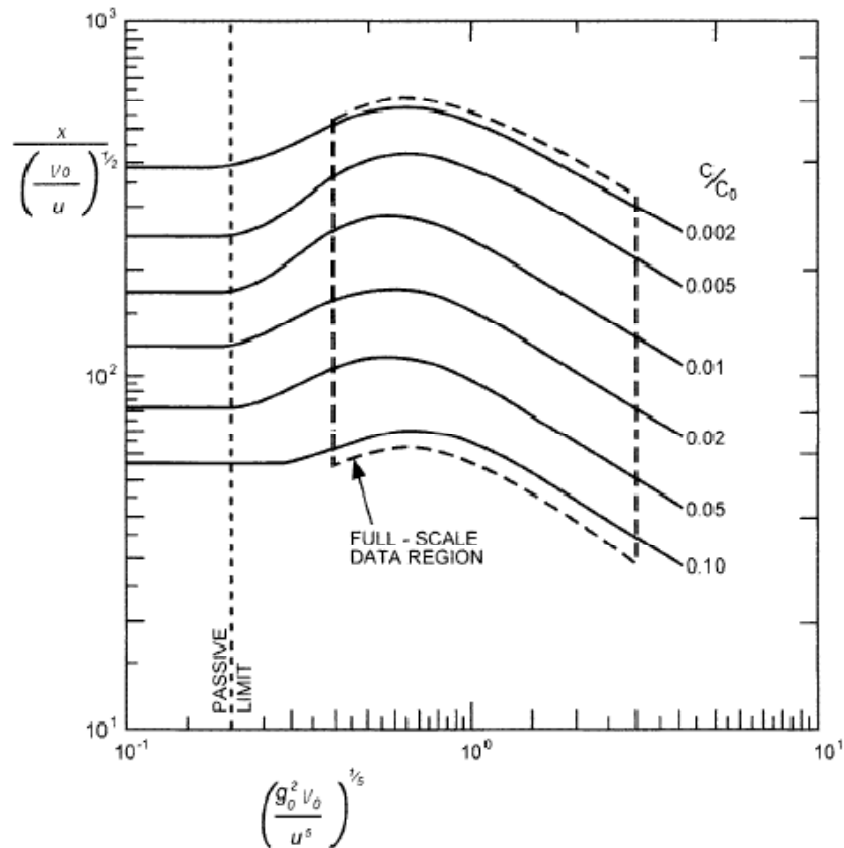


Figura 5.7. Nomograma de emisiones continuas. Recuperado de (Casal, 2008).

Para determinar la distancia segura¹³ de una emisión continua de un gas peligroso más denso que el aire los parámetros requeridos son: el flujo volumétrico de la emisión, la densidad del gas, la densidad del ambiente, la velocidad característica a una altura de 10 m y el radio inicial de la fuente. Con el fin de calcular la distancia segura x a la que se tiene un nivel de concentración seguro es necesario utilizar el nomograma de emisiones continuas. Los pasos a seguir para simular una emisión continua (C. J. H. van den Bosch 2005) son:

- a) Calcular la distancia en la dirección del viento x a un nivel de concentración seguro con los nomogramas (Eisner 1989) del modelo de Britter-McQuaid.

¹³ Adicionalmente consideramos importante definir el término "distancia segura" utilizado en los análisis de los resultados de los modelos, como la distancia a la cual no se presentan efectos severos como consecuencia de la emisión de una sustancia tóxica. En particular para los modelos seleccionados, la distancia segura ha sido considerada a partir del AEGL 1, el cual determina la distancia hasta la cual se esperaría que los individuos experimentarían algún tipo de sintomatología ante la exposición (U.S.Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2010).

b) Calcular la extensión en contra del viento x_u de la pluma, dado por:

$$x_u = b_0 + 2L_b \quad \text{Ecuación 5.119}$$

Donde b_0 es el radio de la nube en la fuente de emisión, y L_b se define como:

$$L_b = \frac{v_0 g_0}{u_a^3} \quad \text{Ecuación 5.120}$$

c) El crecimiento en la dirección del viento del ancho lateral de la pluma $b(x)$ está dado por:

$$b(x) = 2b_0 + 8L_b + 2.5L_b \frac{1}{3} x^{\frac{2}{3}} \quad \text{Ecuación 5.121}$$

El isocontorno entonces puede ser calculado utilizando esta última ecuación (Figura 5.8).

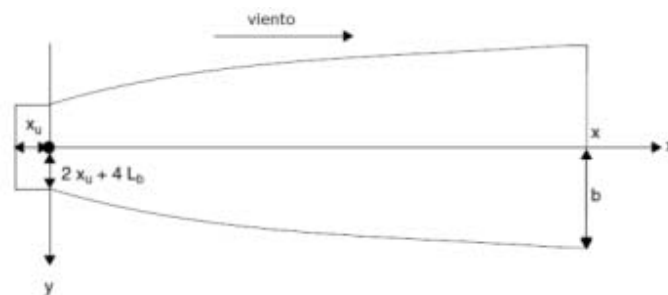


Figura 5.8. Aproximaciones de los contornos de isoconcentración para emisiones continuas. Recuperado de (C. J. H. van den Bosch 2005).

Los tres pasos de cálculo descritos anteriormente están resumidos en el siguiente diagrama de flujo (Figura 5.9).

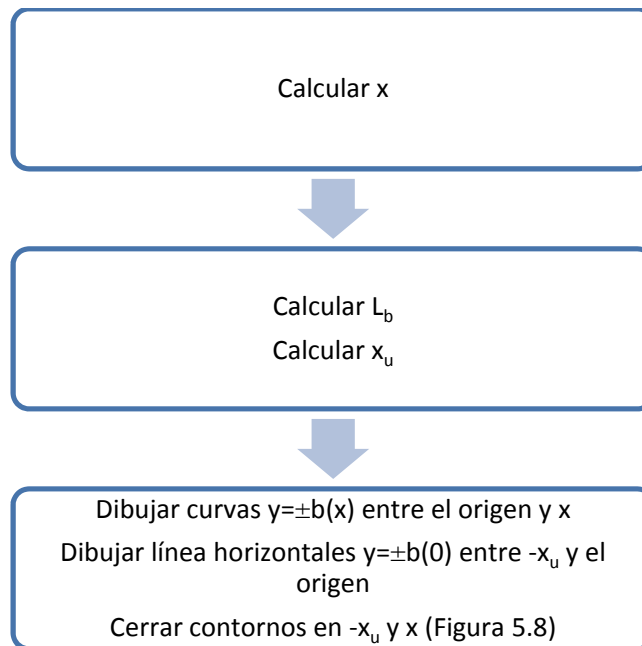


Figura 5.9. Pasos a seguir para estimar las distancias seguras de una emisión continua.
 Recuperado de (C. J. H. van den Bosch 2005).

5.1.4.2 Emisiones instantáneas

De un análisis dimensional, la siguiente relación fue encontrada (Eisner, 1989):

$$\frac{x}{V_0^{1/3}} = f\left(\frac{g_0 V_0^{1/3}}{u^2}\right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 5.122}$$

La Figura 5.10 muestra una gráfica de la correlación basada en la anterior ecuación. De igual manera, se tiene el área para el cual el método ha sido validado experimentalmente y el límite de dispersión pasiva. Las curvas corresponden a los valores indicados para c/c_0 , donde c es la máxima concentración en la dirección del viento.

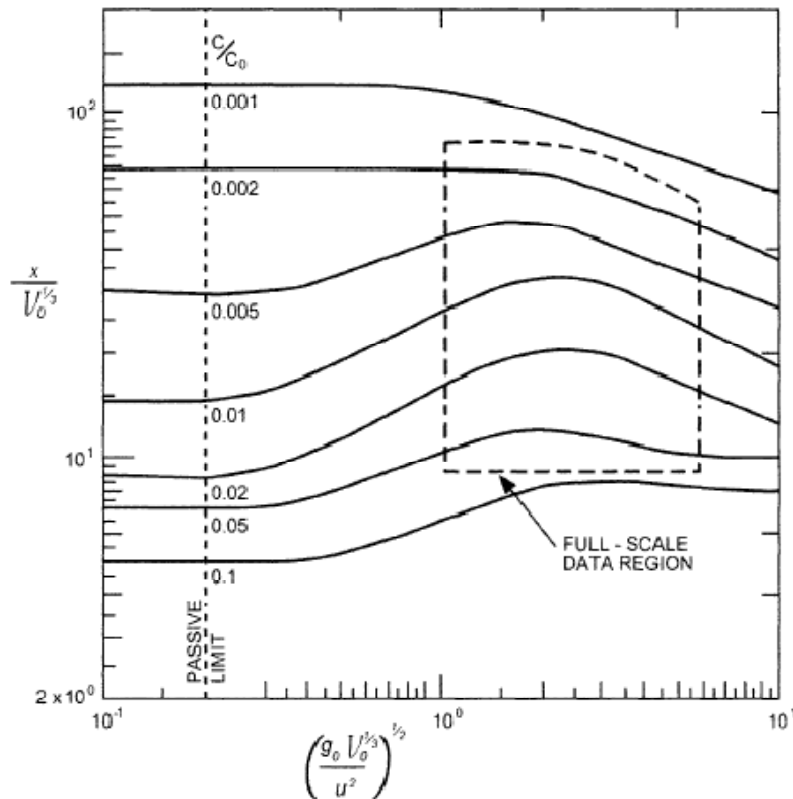


Figura 5.10. Nomograma de emisiones instantáneas. Recuperado de (Casal, 2008)

Para determinar la distancia segura de una emisión instantánea de un gas peligroso más denso que el aire los parámetros requeridos son: el volumen de la emisión, la densidad del gas, la densidad del ambiente, la velocidad característica a una altura de 10 m y el radio inicial de la fuente. Con el fin de calcular la distancia segura x a la que se tiene un nivel de concentración seguro es necesario utilizar el nomograma de emisiones instantáneas (Figura 5.10). Por lo tanto, los pasos a seguir para simular una emisión instantánea (C. J. H. van den Bosch 2005) son:

- Calcular la distancia en la dirección del viento x a un nivel de concentración seguro con los nomogramas (Eisner 1989) del modelo de Britter-McQuaid.
- Calcular el tiempo de llegada t de la nube a x utilizando la relación:

$$x = 0.4u_a t + b(t)$$

Ecuación 5.123

Donde $0.4u_a$ es un estimado empírico de la velocidad de advección y b es el radio de la nube el cual está dado por:

$$b(t) = \sqrt{b_0^2 + 1.2t\sqrt{g_0V_0}} \quad \text{Ecuación 5.124}$$

Donde b_0 es el radio de la nube en la fuente de emisión.

- c) El radio $b(t)$ también es el ancho medio de la nube en el tiempo t . El contorno completo de la concentración segura consiste en una parábola que encierra la fuente y está cerrada por una porción circular del radio $b(t)$ del lado de la dirección del viento (Figura 5.11).

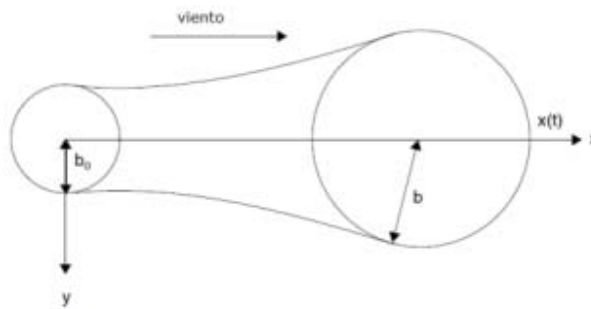


Figura 5.11. Aproximaciones para los contornos de isoconcentración para emisiones instantáneas. Recuperado de (C. J. H. van den Bosch 2005).

Los tres pasos de cálculo están resumidos en el siguiente diagrama de flujo (Figura 5.12).

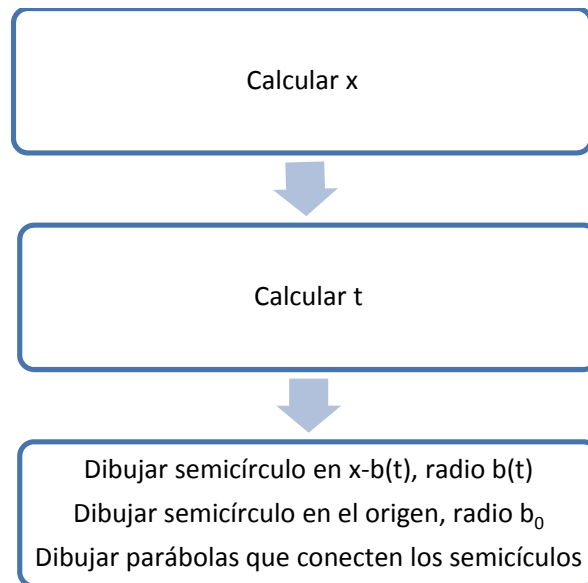


Figura 5.12. Pasos a seguir para estimar las distancias seguras de una emisión instantánea. Recuperado de(C. J. H. van den Bosch 2005).

Emisiones no isotérmicas:

Para condiciones de emisiones no isotérmicas se debe emplear la siguiente corrección para la concentración en la pluma en las ecuaciones de Britter McQuaid, donde c^* es la concentración de interés que debe ser corregida para condiciones no isotérmicas.

$$c = \frac{c^*}{c^* + (1 - c^*) \left(\frac{T_a}{T_0}\right)}$$

Ecuación 5.125

5.1.5 Modelo CFD- Herramientas comerciales

CFD (Computer Fluid Dynamics) es un modelo basado en la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos para solucionar en la mayoría de los casos las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales describen el movimiento de un fluido; y, aunque sus requerimientos computacionales son extensos, es el modelo que puede llegar a obtener los mejores resultados.

Los modelos CFD proveen un análisis complejo del flujo de un fluido basado en la conservación de masa y momento resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando los métodos de diferencias finitas o volumen finito en tres dimensiones. De igual manera, se utiliza el modelo k- ϵ para modelar la turbulencia del sistema calculando el parámetro de viscosidad isotrópico presente en las ecuaciones de transporte de contaminante y momento, el cual supone que el contaminante está diluido equitativamente en todas las direcciones (Holmes and Morawska, 2006).

5.1.5.1 FLACS

FLACS (Flame Acceleration Simulator) es una herramienta computacional para el modelado y simulación de dispersión de gases, explosiones, ventilación, entre otros. Es un programa basado en tecnología CFD desarrollado por Gexcon (Gexcon, 2009). FLACS se ha convertido en un estándar industrial y es utilizado por industrias petroleras y de gas en la evaluación de riesgo de explosiones.

FLACS es un programa utilizado por compañías con el fin de prestar consultorías a industrias petroleras para implementar estrategias que lleven a disminuir riesgos por ejemplo en plataformas de petróleo. Es utilizado entre otras razones porque (Gexcon, 2009):

- Tiene un uso eficiente de geometrías a través de importaciones CAD14.
- Ha sido validado de manera extensiva con experimentos.
- Fue desarrollado con la cooperación de industrias de petróleo y gases.
- Tiene variedad de aplicaciones, entre ellas: ventilación, dispersión de gases, explosiones, polvos, hidrocarburos e hidrógeno.

Por otro lado, FLACS es utilizado por las industrias entre otras cosas para: la evaluación cuantitativa de riesgos, investigaciones de accidentes, identificar y evaluar el escenario en el peor caso, predicción del efecto de la mitigación, dispersión de gases tóxicos y estudios de la dispersión de gas natural líquido (de ahora en adelante referido como LNG).

La herramienta FLACS es un código CFD el cual resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes compresibles en un plano cartesiano tridimensional utilizando el método de volumen finito. Las ecuaciones de conservación de masa, impulso,

¹⁴ Computer Aided Design (CAD por su sigla en inglés) es el uso de computadores para desarrollar el proceso de diseño de geometrías.

entalpía, turbulencia, especies y la ley de gas ideal se incluyen. Por otro lado, el algoritmo de corrección de presión SIMPLE es aplicado y utiliza el modelo k- ϵ para el cálculo de la turbulencia del sistema. Por último, el código de FLACS utiliza un concepto de porosidad distribuida (Middha and Hansen, 2009) el cual permite una representación detallada de geometrías complejas utilizando un plano cartesiano.

FLACS ha sido validado de manera extensiva para la dispersión de gases más livianos que el aire por (Baraldi, Kotchourko et al. 2009; Middha and Hansen 2009; Middha, Hansen et al. 2009) quienes utilizan la herramienta FLACS para comprobar su exactitud en escenarios de dispersión de hidrógeno. De igual manera ha sido validado en escenarios de dispersión alrededor de edificios y obstáculos (Hanna, Hansen et al. 2004) y dispersión de gases más densos que el aire en áreas urbanas e industriales (Hanna, Hansen et al. 2009).

5.1.6 Modelos en software de libre distribución

Existen diferentes software en el mercado, algunos de los cuales han sido desarrollados bajo el esquema de libre distribución. Uno de ellos es el Software Areal Locations of Hazardous Atmospheres ALOHA™ el cual fue desarrollado por la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del gobierno de los Estados Unidos como herramienta para la respuesta a accidentes químicos y entrenamiento de respuesta a emergencias. ALOHA™ funciona con dos modelos de dispersión. El primero de ellos es para gases con densidad similar o inferior a la del aire: Gaussiano (Sección 5.1.2), el otro es para la dispersión de gases más densos que el aire: DEGADIS (sección 5.1.6.1).

5.1.6.1 *DEGADIS*

El modelo de dispersión de gases densos DEGADIS (Dense Gas Dispersion Model) fue desarrollado en la Universidad de Arkansas (Spicer & Havens, 1989) desde 1989. El modelo describe procesos dispersivos que están gobernados por flujos por gravedad y arrastre de la sustancia en dirección del viento y sobre la capa límite del flujo.

La versión usada en ALOHA™ es una simplificación del modelo original del DEGADIS que se conoce como ALOHA-DEGADIS. Para su simplificación: 1). no se utilizó el modelo Ooms para fuentes elevadas, llegando a suponer que todas las descargas ocurren sobre superficies planas, a nivel del suelo, bajo cierta área, y que, su momentum es cero; 2). los algoritmos usados para la resolución de

ecuaciones están adaptados para ser más rápidos; y 3). se modelan fuentes con tasa de descarga variante en el tiempo. Todas estas simplificaciones fueron realizadas con el fin de que ALOHA™ sea utilizado para la respuesta a emergencias.

5.2 Selección de modelos

De la correcta selección de un modelo así como de la calidad de información dependerán los resultados obtenidos en una simulación. Durante el proceso de selección de un modelo es necesario tener en cuenta las ventajas y desventajas de cada uno de los que existan o estén disponibles, dependiendo de la facilidad para modelar el evento y los requerimientos de la autoridad. Para hacer posible la simulación debe contarse además con una herramienta para tal fin, bien puede ser una construcción propia en hojas de cálculo para modelos simples, software comercialmente disponibles y/o de libre distribución.

Con el fin de establecer el modelo que permitiera simular de manera simple y precisa un evento de liberación de un gas más denso que el aire se llevan a cabo las acciones que se describen a continuación:

Con base en la revisión previa (Sección 5.1) de los modelos para la dispersión de gases más densos que el aire y los resultados de validación de los modelos estudiados que a continuación se presentan (Sección 5.2.1), se estableció que los modelos más apropiados para trabajar el desarrollo de una herramienta computacional eran los modelos SLAB y Britter-McQuaid. Estos dos modelos presentan un amplio uso y documentación en estudios internacionales; permiten la construcción de escenarios reales bajo emisiones continuas o discretas, y cuentan con ventajas y limitaciones propias de cada modelo.

Una vez seleccionados y validados los modelos se procede a la construcción de una herramienta de simulación de dispersión de gases más densos que el aire. En el marco del presente convenio la herramienta desarrollada fue denominada SiDiG – Simulación de Dispersión de Gases. En el Anexo A - Herramientas Computacionales, reposa la información referente a este proceso.

5.2.1 Validación de la herramienta

La herramienta desarrollada o utilizada debe someterse a un proceso de validación riguroso con el fin de establecer bajo qué condiciones sus resultados

son confiables. La forma básica de validación consiste en replicar casos estudiados con anterioridad para comparar resultados y así determinar si dichos resultados tienen consistencia. Todas las veces que pueda ser probada la herramienta y que evidencie errores, esta debe ser corregida. Este proceso genera robustez y confiabilidad en los resultados.

Así mismo, los modelos seleccionados deben atravesar un proceso de validación.

En este convenio, para llevar a cabo esta validación se propuso tomar el modelo CFD como el modelo de referencia, o el más cercano a la realidad. Esta suposición se realizó ya que el modelo CFD, y específicamente la herramienta FLACS, ha sido validado extensivamente para la dispersión de hidrocarburos más densos que el aire. Por lo tanto, se asume que construyendo correctamente un escenario de la dispersión de un hidrocarburo más denso que el aire, los resultados arrojados por FLACS serán los más cercanos a la realidad, y por lo tanto, se puede tomar este modelo como referencia para validar los otros.

Para realizar este procedimiento se construyó un escenario involucrando una emisión de propano. Se buscó simular el peor de los escenarios por lo que las siguientes suposiciones fueron hechas:

- La dispersión se llevó a cabo en un ambiente con una velocidad del viento y una turbulencia muy bajas.
- Se supuso una condición de estabilidad de Pasquill-Gifford de F (muy estable).
- La emisión se da a través de un orificio de 2 cm de diámetro en un tanque almacenando propano licuado.
- La emisión tiene una duración de 10 min (600 s).¹⁵

La construcción del escenario no puede realizarse en el punto de la fuga (pues en este punto el jet que se tiene es una mezcla de las fases líquida y gaseosa), sino que dicho escenario se debe construir a una distancia tal que todo el jet se ha evaporado. Para calcular la distancia a la que el jet se ha evaporado y las propiedades del jet (temperatura, flujo) a esta distancia x_f se utilizó el programa flash disponible en FLACS.

¹⁵ La razón por la cual los escenarios para la dispersión se realizan a 10 minutos se sustenta en el tiempo mínimo esperado de respuesta (atención) de la fuga o derrame de material tóxico. Además, éste es el tiempo mínimo para el cual existen valores de referencia AEGL.

El programa flash es una utilidad que permite calcular las propiedades de una emisión flash de un gas licuado a presión. El termino flash suele utilizarse para describir la formación de vapor debido a cambios de presión. Muchos materiales (tales como amoniaco, cloro y propano) se almacenan como líquidos presurizados.

Para condiciones de almacenamiento presurizadas, la emisión tiene en la atmósfera la apariencia de un jet de dos fases compuesto de gotas de líquido y vapor. En la Figura 5.13 se muestra este comportamiento.

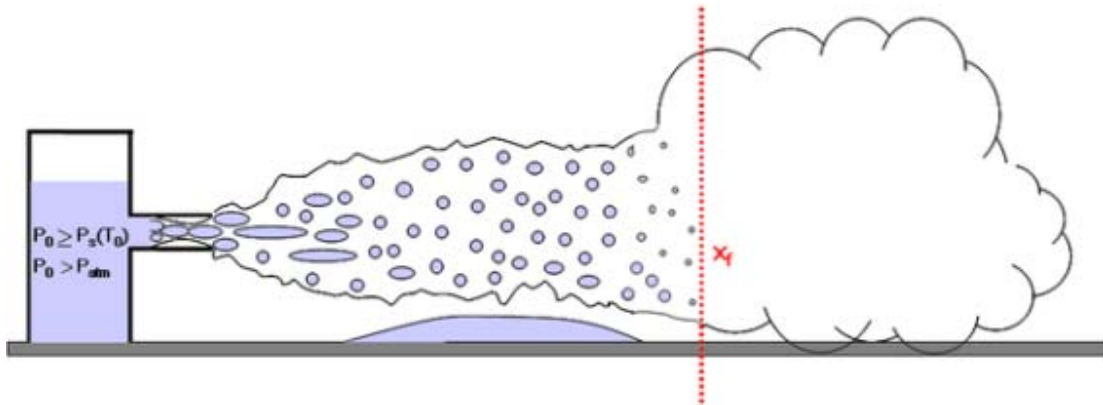


Figura 5.13. Formación de un jet a partir de una fuga de un tanque almacenando un gas licuado a presión. Recuperado de (Gexcon 2009).

A la distancia x_f toda la emisión se ha evaporado y el jet está en una fase de vapor, con las propiedades que se calculan a esta distancia que se debe construir el escenario. El programa requiere los siguientes parámetros (Tabla 5.6):

Tabla 5.6. Parámetros necesarios para calcular las propiedades de un jet.

Parámetro	Valor
Gas emitido	Propano
Área del orificio (m ²)	0.000314
Temperatura del gas licuado en el orificio (°C)	20
Coefficiente de descarga	0.62
Altura del gas licuado (m)	0
Presión parcial de otros gases (kPa)	0
Temperatura del ambiente (°C)	20

De esta manera se obtienen las siguientes condiciones del jet (Tabla 5.7).

Tabla 5.7. Propiedades del jet de propano.¹⁶

Parámetro	Valor
Área del jet (m ²)	0.542
Flujo másico del jet (kg/s)	20.64
Temperatura del jet (°C)	-73.116

En esta tabla (Tabla 5.7) el área del jet es el área transversal del jet (en el plano perpendicular al eje x) a la distancia x_f .

Por lo tanto, con estas condiciones se construyeron escenarios para realizar la simulación de un jet horizontal utilizando los siguientes modelos:

- Modelo de Pasquill-Gifford
- Modelo de Britter-McQuaid
- Modelo SLAB
- Modelo CFD (FLACS)

¹⁶ Estos datos fueron obtenidos empleando el programa flash disponible en el software FLACS.

De igual manera, lo que se busca es calcular los isocontornos de concentración para los valores de AEGL del propano. En la Tabla 5.8 se tienen los valores de AEGL para diferentes tiempos de exposición.

Tabla 5.8. Valores de AEGL para diferentes tiempos de exposición a propano.

Propano					
	10 min	30 min	60 min	4 h	8 h
AEGL 1 (ppm)	10000	6900	5500	5500	5500
AEGL 2 (ppm)	17000	17000	17000	17000	17000
AEGL 3 (ppm)	33000	33000	33000	33000	33000

Dado que se supuso el peor de los escenarios con una duración de emisión de 10 min, se utilizarán dichos valores de AEGL para calcular los isocontornos de concentración y determinar tanto distancias seguras como ancho máximo de la nube tóxica.

Los parámetros utilizados en el modelo de Pasquill-Gifford se muestran en la Tabla 5.9:

Tabla 5.9. Parámetros de un jet horizontal de propano mediante Pasquill-Gifford.

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Emisión continua
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Propano
Peso molecular del material (g/mol)	44.097
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	200.054
Flujo másico de la fuente (g/s)	20640
Altura de la fuente (m)	2.15
Parámetros Meteorológicos	
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	1.8
Condición del terreno	Rural
Valor de la clase de estabilidad	F

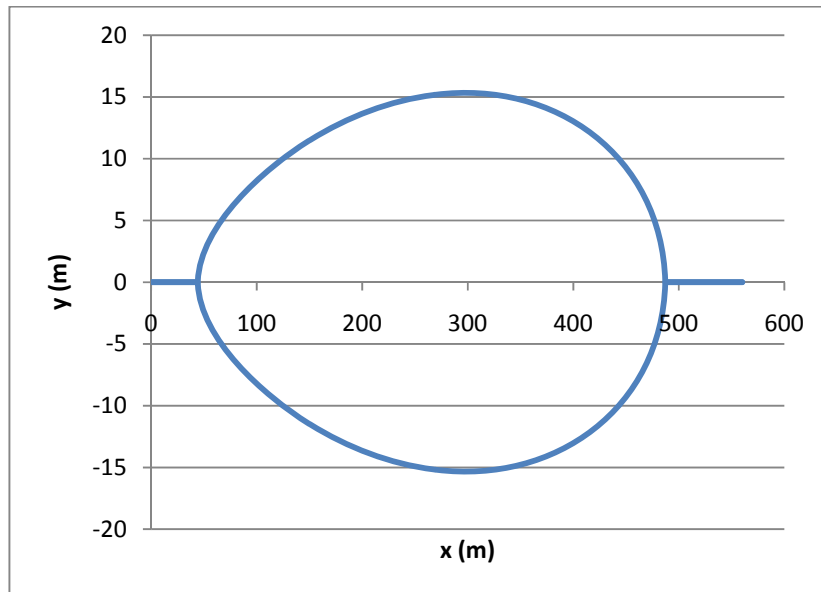


Figura 5.14. Isocontorno de concentración de propano de 10000 ppm debido a un jet horizontal mediante Pasquill-Gifford.

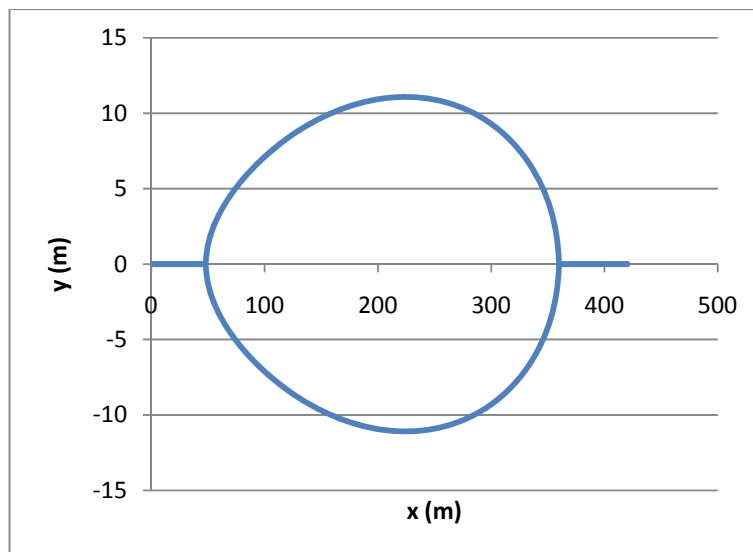


Figura 5.15. Isocontorno de concentración de propano de 17000 ppm debido a un jet horizontal mediante Pasquill-Gifford.

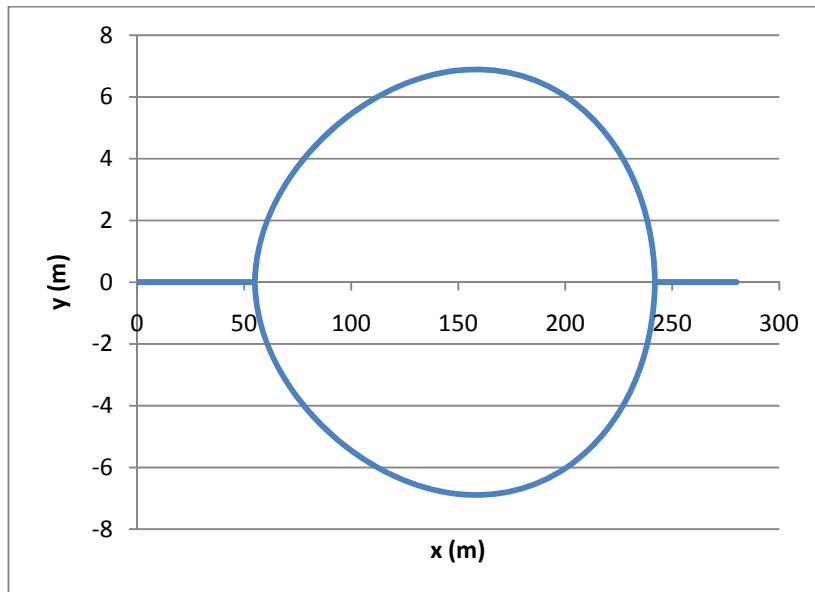


Figura 5.16. Isocontorno de concentración de propano de 30000 ppm debido a un jet horizontal mediante Pasquill-Gifford.

En la Figura 5.14, la Figura 5.15 y la Figura 5.16 se tienen los isocontornos de concentración para 10000, 17000 y 33000 ppm (valores de AEGL 1, 2 y 3 respectivamente para un tiempo de exposición de 10 min). Los resultados de distancia segura y ancho máximo para cada concentración se resumen en la Tabla 5.10:

Tabla 5.10. Resultados obtenidos para un jet horizontal de propano mediante Pasquill-Gifford.

Concentración (ppm)	Distancia segura (m)	Ancho máximo (m)
10000	487	30.65
17000	360	22.18
33000	242	13.78

Los parámetros utilizados en el modelo de Britter-McQuaid se muestran en la Tabla 5.11:

Tabla 5.11. Parámetros de un jet horizontal de propano mediante Britter-McQuaid.¹⁷

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Emisión continua
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Propano
Densidad característica del material de la fuente (kg/m ³)	RHO = 2.33
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	TS = 200.034
Flujo volumétrico de la fuente (m ³ /s)	QT = 8.86
Radio de la fuente (m)	R = 0.368
Parámetros Meteorológicos	
Densidad característica del aire del ambiente (kg/m ³)	RHOA = 1.20
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	UA = 1.8

En las Figura 5.17, Figura 5.18 y Figura 5.19 se tienen los isocontornos de concentración para 10000, 17000 y 33000 ppm (valores de AEGL 1, 2 y 3 respectivamente para un tiempo de exposición de 10 min) para el modelo Britter-McQuaid.

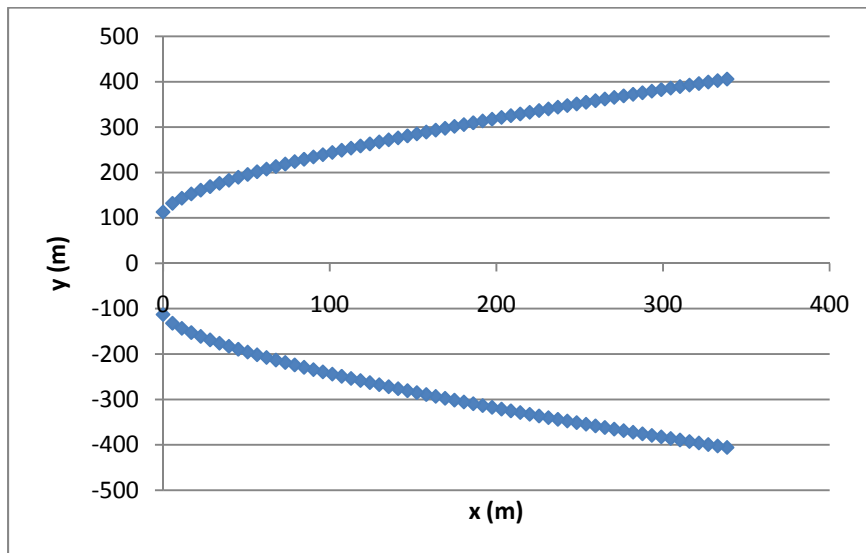


Figura 5.17. Isocontorno de concentración de propano de 10000 ppm debido a un jet horizontal mediante Britter-McQuaid.

¹⁷ La obtención del parámetro "Flujo volumétrico de la fuente" se realiza empleando el método presentado en el Anexo B, Ecuación B.7.

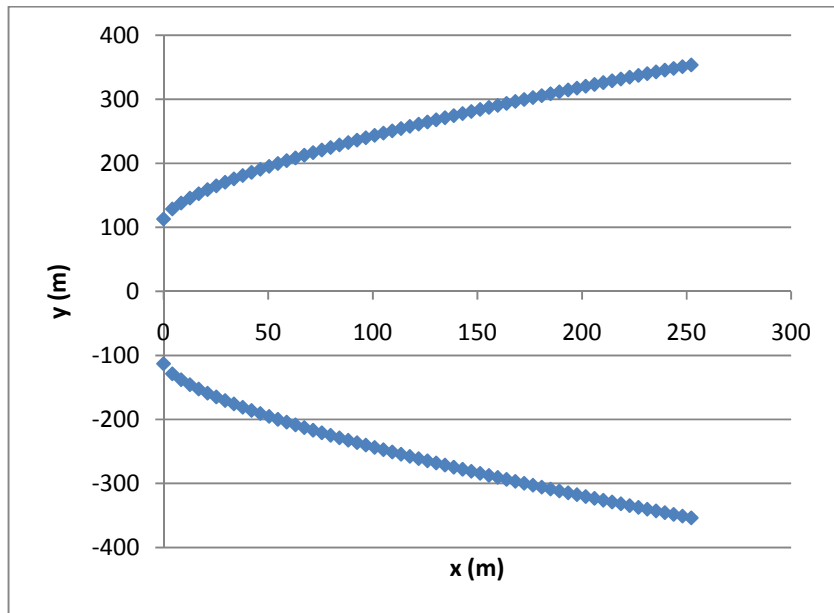


Figura 5.18. Isocontorno de concentración de propano de 17000 ppm debido a un jet horizontal mediante Britter-McQuaid.

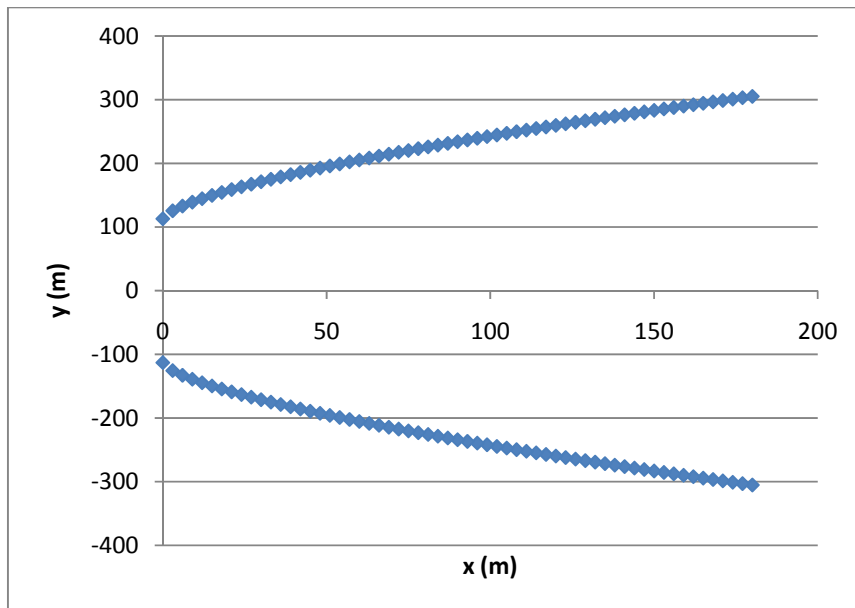


Figura 5.19. Isocontorno de concentración de propano de 30000 ppm debido a un jet horizontal mediante Britter-McQuaid.

Los resultados de distancia segura y ancho máximo para cada concentración obtenidos por medio del modelo Britter-McQuaid se resumen en la Tabla 5.12:

Tabla 5.12. Resultados obtenidos para un jet horizontal de propano mediante Britter-McQuaid.

Concentración (ppm)	Distancia segura (m)	Ancho máximo (m)
10000	339	811.7
17000	253	707.5
33000	180	610.5

Por otro lado, los parámetros utilizados para la simulación en el modelo SLAB se muestran en la Tabla 5.13:



 <p>ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

Tabla 5.13. Parámetros de un jet horizontal de propano mediante SLAB.

Tipo de fuente	
Tipo de derrame Parámetro del subpaso numérico	Emisión de un jet horizontal NCALC = 1
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico Peso molecular del material de la fuente (kg) Capacidad calorífica del vapor a presión constante (J/kg K) Temperatura del punto de ebullición (K) Fracción másica del líquido inicial Calor de vaporización (J/kg) Capacidad calorífica del líquido (J/kg K) Densidad del líquido del material de la fuente (kg/m ³) Primera constante de la presión de saturación Segunda constante de la presión de saturación (K)	Propano WMS = 0.044097 CPS = 1678 TBP = 231.09 CMEDO = 0.0 DHE = 425740 CPSL = 2520 RHOSL = 500.5 SPB = 1872.46 SPC = -25.16
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K) Flujo másico de la fuente (kg/s) Área de la fuente (m ²) Duración de la fuente continua (s) Masa de la fuente instantánea (kg) Altura de la fuente (m)	TS = 200.034 QS = 20.64 AS = 0.542 TSD = 600 QTIS = 0 HS = 2.15
Parámetros del Campo	
Tiempo para promediar la concentración (s) Distancia máxima en la dirección del viento (m) Alturas del cálculo de concentración (m)	TAV = 600 XFFM = 1500 ZP = 0
Parámetros Meteorológicos	
Altura de la rugosidad de la superficie (m) Altura de la medición del ambiente (m) Velocidad del viento del ambiente (m/s) Temperatura del ambiente (K) Humedad relativa (%) Valores de la clase de estabilidad	ZO = 0.0002 ZA = 10 UA = 1.8 TA = 293.15 RH = 70 STAB = 6

En las Figura 5.20, Figura 5.21 y Figura 5.22 se tienen los isocontornos de concentración para 10000, 17000 y 33000 ppm (valores de AEGL 1, 2 y 3 respectivamente para un tiempo de exposición de 10 min) para el modelo SLAB.

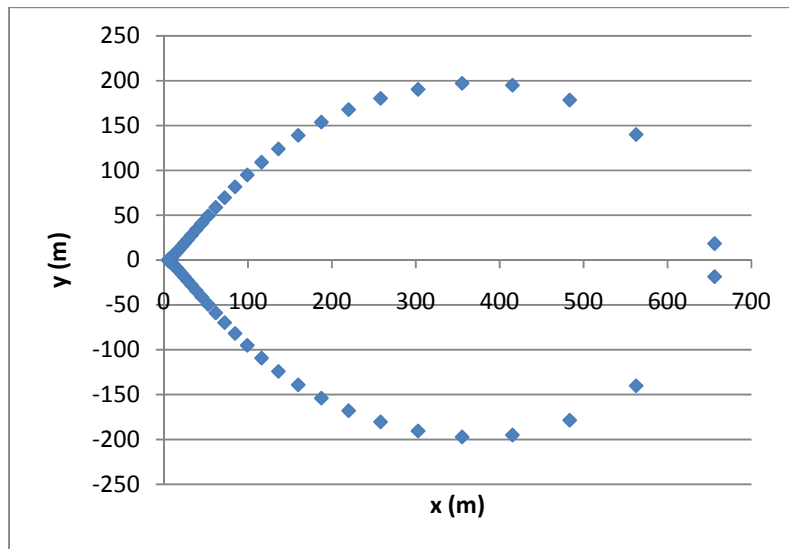


Figura 5.20. Isocontorno de concentración de propano de 10000 ppm debido a un jet horizontal mediante SLAB a una altura de 0.2 m.

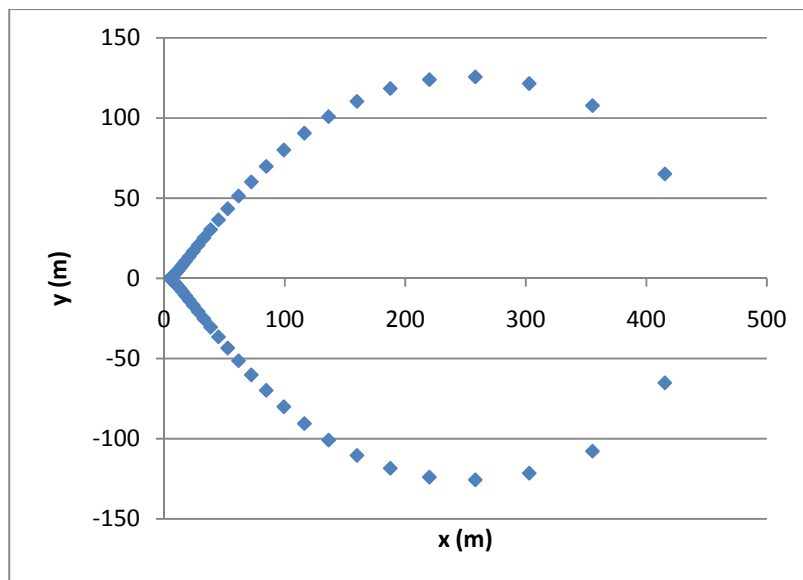


Figura 5.21. Isocontorno de concentración de propano de 17000 ppm debido a un jet horizontal mediante SLAB a una altura de 0.2 m.

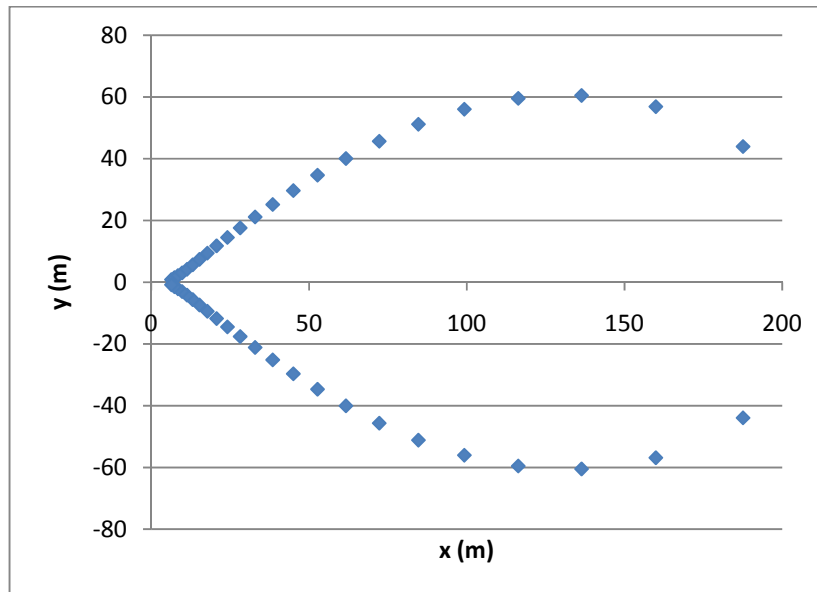


Figura 5.22. Isocontorno de concentración de propano de 30000 ppm debido a un jet horizontal mediante SLAB a una altura de 0.2 m.

Los resultados de distancia segura y ancho máximo obtenidos empleando el modelo SLAB para cada concentración se resumen en la Tabla 5.14:

Tabla 5.14. Resultados obtenidos para un jet horizontal de propano mediante SLAB.

Concentración (ppm)	Distancia segura (m)	Ancho máximo (m)
10000	656	394.3
17000	415	251.4
33000	188	121.0

Por último, se realizó la simulación en la herramienta computacional FLACS. Se utilizaron los mismos parámetros a aquellos usados en las simulaciones anteriores.

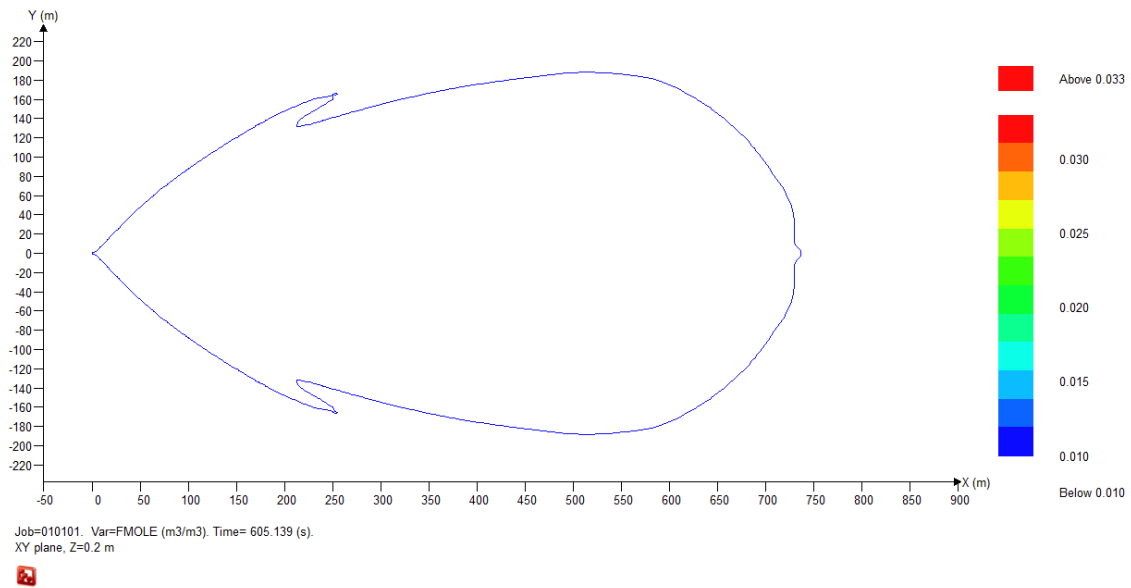


Figura 5.23. Isocontorno de concentración de propano de 10000 ppm debido a un jet horizontal obtenido mediante FLACS a una altura de 0.2 m.

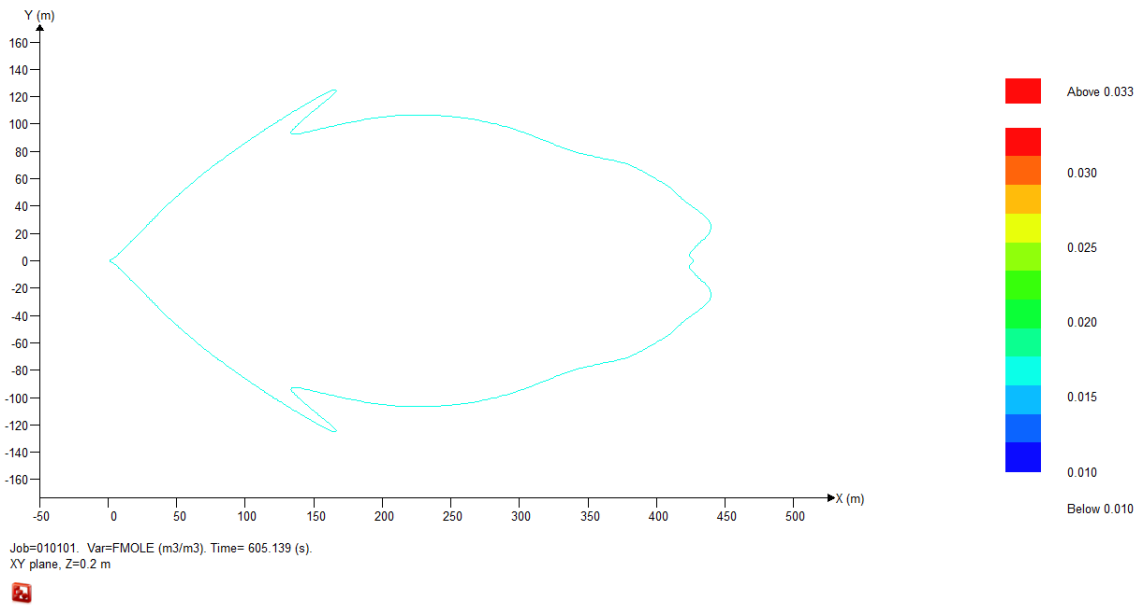


Figura 5.24. Isocontorno de concentración de propano de 17000 ppm debido a un jet horizontal obtenido mediante FLACS a una altura de 0.2 m.

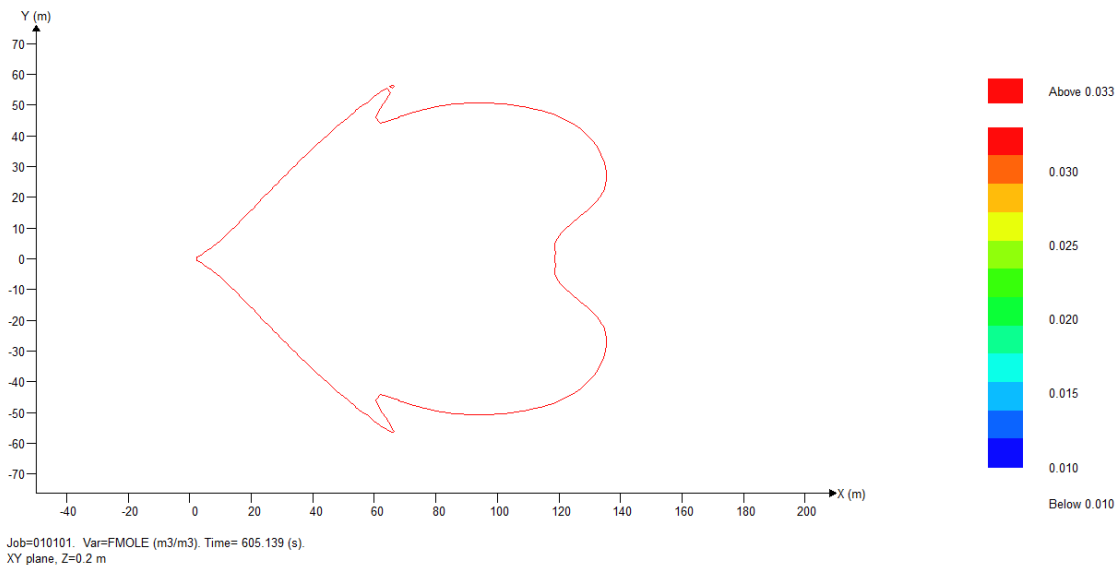


Figura 5.25. Isocontorno de concentración de propano de 30000 ppm debido a un jet horizontal obtenido mediante FLACS a una altura de 0.2 m.

En las Figura 5.23, Figura 5.24 y Figura 5.25 se tienen los isocontornos de concentración para 10000, 17000 y 33000 ppm (valores de AEGL 1, 2 y 3 respectivamente para un tiempo de exposición de 10 min) simulados con el modelo FLACS. Los resultados de distancia segura y ancho máximo para cada concentración se resumen en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15. Resultados obtenidos para un jet horizontal de propano mediante FLACS.

Concentración (ppm)	Distancia segura (m)	Ancho máximo (m)
10000	750	380
17000	450	260
33000	140	110

Una vez terminadas las simulaciones mediante los cuatro modelos, se calcularon porcentajes de error respecto a los resultados obtenidos en FLACS, pues la hipótesis propuesta es que teniendo una construcción de escenario apropiada los resultados arrojados por el modelo CFD serían los más cercanos a la realidad. En las Tablas 5.16, 5.17 y 5.18 se tienen los porcentajes de error para los modelos

de Pasquill-Gifford, Britter-McQuaid y SLAB respectivamente. De igual manera, en la Figuras 5.26, 5.27 y 5.28 se tiene la superposición de los isocontornos de una concentración de 17000 ppm de la emisión de propano del modelo de Pasquill-Gifford, el modelo de Britter-McQuaid y el modelo SLAB con respecto a los resultados obtenidos mediante el modelo CFD.

Tabla 5.16. Porcentajes de error del modelo de Pasquill-Gifford respecto al modelo CFD.

Concentración (ppm)	Porcentaje de error de la distancia segura (%)	Porcentaje de error del ancho máximo (%)
10000	-35.1	-91.9
17000	-20.0	-91.5
33000	-72.9	-87.5

Observando primero los resultados para el modelo de Pasquill-Gifford (Tabla 5.16) se percibe que para concentraciones pequeñas (mayores distancias) se tienen unos porcentajes de error de la distancia segura de 20.0%, mientras que para una concentración de 33000 ppm el porcentaje de error aumenta hasta 72.9%. Por lo tanto, el modelo de Pasquill-Gifford podría llegar a predecir la distancia segura, sin embargo, el modelo falla en el momento de modelar el ancho máximo de la nube, pues lo subestima en cantidades de hasta 91.9%. Esto sucede porque el modelo de Pasquill-Gifford, por ser un modelo para gases con flotabilidad neutra (de una densidad similar a la del aire), no simula adecuadamente el descenso de la nube al nivel del suelo, sino que se mantiene a la altura de la emisión (2.15 m) y toca el suelo únicamente porque la nube aumenta en tamaño de acuerdo al perfil Gaussiano supuesto en el modelo. Es por esto que el modelo de Pasquill-Gifford aunque podría llegar a predecir la distancia segura de la nube, falla en el momento de simular el descenso de la nube y por lo tanto calcular su ancho máximo, realizando una subestimación de grandes proporciones que puede llegar a ser peligrosa.

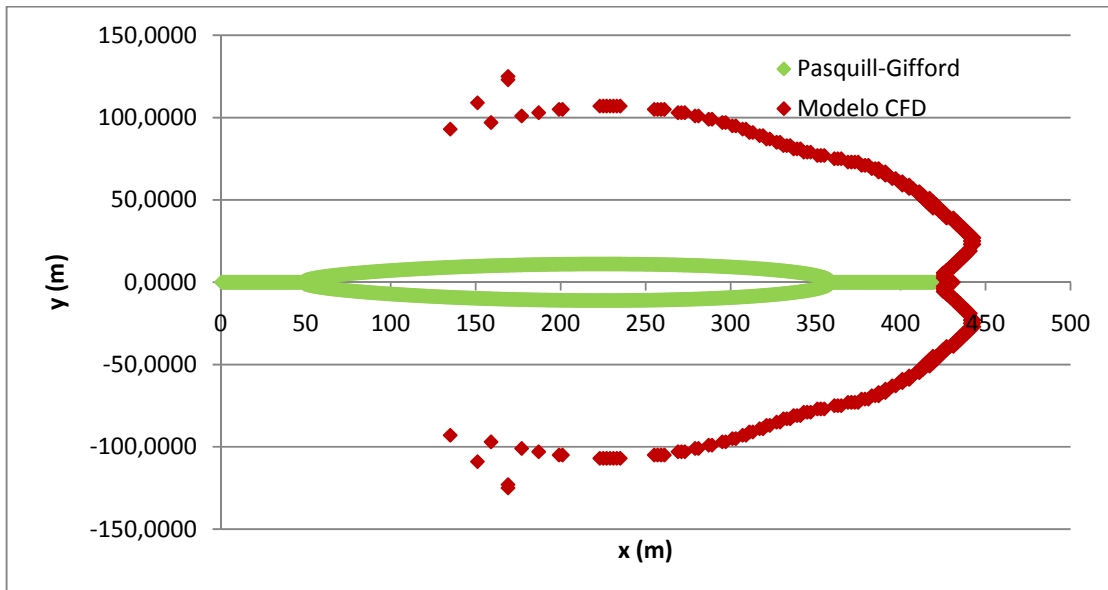


Figura 5.26. Superposición de isocontornos de concentración de 17000 ppm de una emisión de propano en 10 minutos. Validación modelo Pasquill-Gifford respecto a FLACS.

Este resultado se puede corroborar en la Figura 5.26. Según los resultados obtenidos para una concentración de 17000 ppm, este modelo subestima las dimensiones que alcanza la nube (como se puede ver por el isocontorno obtenido mediante el modelo CFD). Es decir, el modelo de Pasquill-Gifford en este caso subestima tanto la distancia máxima en el eje x alcanzada por la nube como el ancho máximo de la nube. Esto sucede porque el modelo de Pasquill-Gifford es un modelo para gases neutrales, o de una densidad similar a la del aire, y por lo tanto la nube nunca desciende al suelo como sucede en la dispersión de un gas más denso que el aire.

Tabla 5.17. Porcentajes de error del modelo de Britter-McQuaid respecto al modelo CFD.

Concentración (ppm)	Porcentaje de error de la distancia segura (%)	Porcentaje de error del ancho máximo (%)
10000	-54.8	113
17000	-43.8	172
33000	-28.6	455

Por otro lado, el modelo de Britter-McQuaid (Tabla 5.17) también presenta grandes desviaciones respecto a los resultados obtenidos mediante el modelo CFD. En cuanto a la predicción de la distancia segura, el modelo de Britter-McQuaid parece mejorar al aumentar la concentración para la cual se desea conocer el isocontorno, pues a 10000 ppm el porcentaje de error es de 54.8% mientras que para 33000 ppm disminuye hasta 28.6%. Sin embargo, este error continúa siendo importante para los resultados que se desean obtener y puede darse debido a la gran cantidad de simplificaciones que realiza el modelo de Britter-McQuaid, tales como suponer que las condiciones atmosféricas no afectan la dispersión del gas. Respecto al cálculo del ancho máximo de la nube, el modelo de Britter-McQuaid sobreestima los valores reales por porcentajes del orden de 455% para 33000 ppm. Sin embargo, si se compara con respecto al modelo de Pasquill-Gifford, Britter-McQuaid sobreestima estos valores, resultado que es preferible a subestimar en el análisis de riesgos.

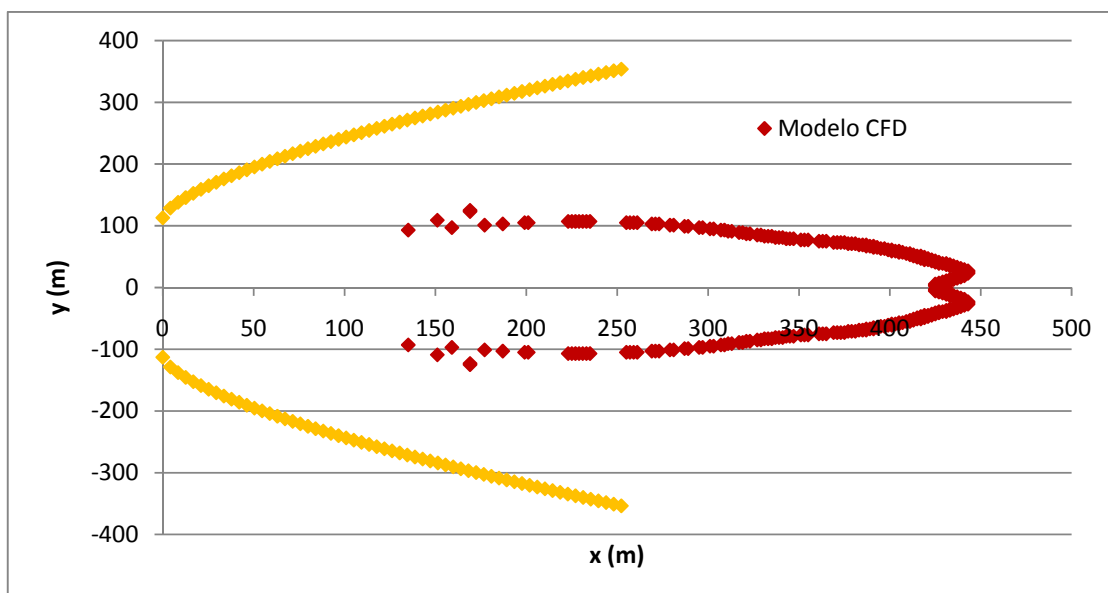


Figura 5.27. Superposición de isocontornos de concentración de 17000 ppm de una emisión de propano en 10 minutos. Validación modelo Britter-McQuaid respecto a FLACS.

En la Figura 5.27 se puede observar que el modelo de Britter-McQuaid sobreestima el ancho máximo de la nube para una concentración de 17000 ppm, pero la distancia alcanzada por la nube es aproximadamente la mitad de la distancia que alcanza en realidad (de acuerdo a los resultados obtenidos mediante el modelo CFD). Por otro lado, esta figura permite ver que mientras FLACS modela apropiadamente la forma de la nube, el modelo de Britter-McQuaid tiene una gran limitación asociada a que la nube continúa creciendo indefinidamente en

el eje y. Esto se debe a las simplificaciones que realiza el modelo de Britter-McQuaid, en el que a partir de una distancia segura y una ecuación se puede calcular el isocontorno.

Tabla 5.18. Porcentajes de error del modelo SLAB respecto al modelo CFD.

Concentración (ppm)	Porcentaje de error de la distancia segura (%)	Porcentaje de error del ancho máximo (%)
10000	12.5	3.76
17000	7.78	3.31
33000	34.3	10.0

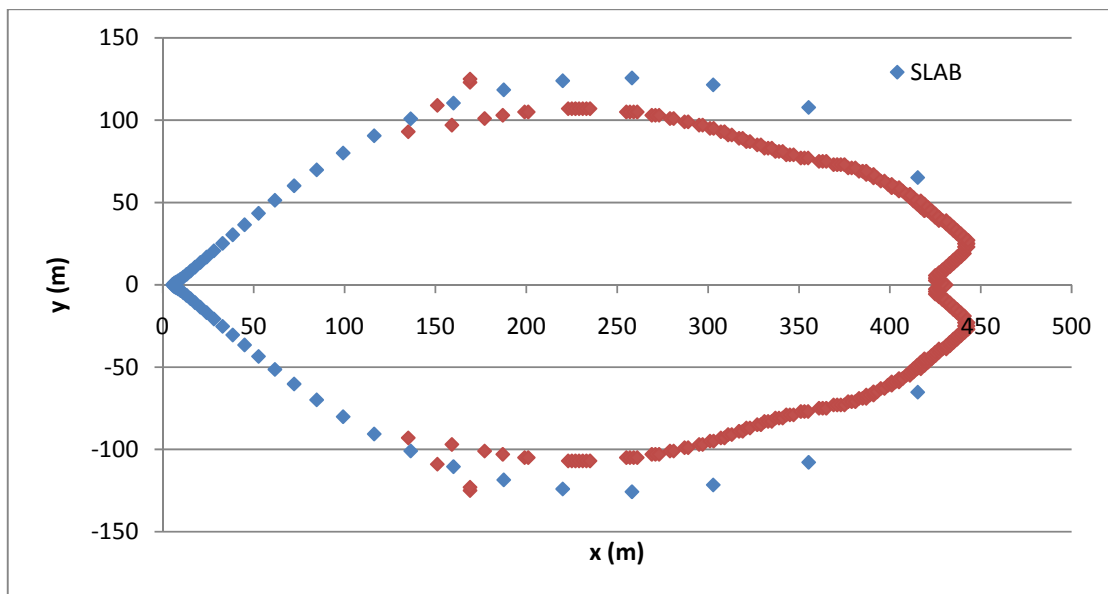


Figura 5.28. Superposición de isocontornos de concentración de 17000 ppm de una emisión de propano en 10 minutos. Validación modelo SLAB respecto a FLACS.

Por último se tiene el modelo SLAB. Respecto a la distancia segura obtenida en FLACS, el error máximo obtenido en el modelo SLAB es de 34.3% para una concentración de 33000 ppm. Sin embargo, para una concentración de 17000 ppm (Figura 5.28) llega a tener un error de 7.78%, prediciendo la dispersión de la nube con alta exactitud. De igual manera, simulando el ancho máximo de la nube, el error máximo que se obtiene mediante SLAB es de 10.0% para una concentración

de 33000 ppm. Sin embargo, se obtuvieron errores tan bajos como de un 3.31% para 17000 ppm. Estos resultados demuestran que SLAB predice con gran exactitud tanto la distancia segura como el ancho máximo de la nube. De igual manera, los tiempos de simulación de SLAB son del orden de segundos, mientras que FLACS puede demorar desde unas cuantas horas hasta días, mostrándonos una de las mayores ventajas que tiene SLAB sobre FLACS.

5.2.2 Casos de estudio

Una vez realizada la validación de los modelos dentro de la herramienta de simulación se procede al uso de la misma mediante estudios de caso. La definición de los estudios de caso está determinada por la finalidad de la simulación y la pertinencia de los mismos. Para los estudios de caso, estos deberán desarrollarse conforme el industrial considere necesario para prepararse a nivel interno ante la ocurrencia de la fuga accidental de una sustancia tóxica, o, conforme la autoridad competente se lo solicite.

En el Capítulo 7 del presente documento se encuentra una guía para la construcción de escenarios o casos de estudio.

Estos casos deben ser construidos, simulados y analizados. Para el análisis de los mismos debe tenerse en cuenta el análisis de consecuencias, que puede ser consultado en el capítulo siguiente.

6. ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS

Para realizar el análisis de consecuencias es necesario que el analista tenga presente las siguientes recomendaciones, con el objetivo de determinar el grado de afectación a las personas como producto de la dispersión de nubes tóxicas.

6.1 Aproximación empírica

Los datos empíricos de efectos de dispersión de gases tóxicos, proveen el daño general producido por la interacción de un ser humano con un vapor/gas a una concentración establecida.

6.1.1 Daño a personas

La propuesta que se presenta en este documento relaciona tres niveles (umbrales) de afectación asociados a la concentración experimentada por un individuo sobre el cual incide una nube de gas tóxico. Dicha concentración experimentada dependerá de la localización (distancia en metros en la dirección del viento) del individuo respecto al epicentro de liberación de sustancia (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Niveles de afectación en humanos por efecto de gases tóxicos

ZONA	NIVEL	Concentración
A	Efectos letales o que amenazan la vida.	AEGL3
B	Efectos serios y/o irreversibles.	AEGL2
C	Efectos reversibles.	AEGL1

Las zonas A, B y C tienen asociadas cada una un valor de distancia segura y ancho máximo de nube, calculadas a partir de los modelos presentados en la Sección 5 (ANÁLISIS DE RIESGOS: ÁREA DE INFLUENCIA DE EFECTOS TÓXICOS POR DISPERSIÓN DE GASES MÁS DENSOS QUE EL AIRE (NUBE TÓXICA)) de este documento.

Los valores determinados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA, por su sigla en inglés) llamados AEGL (Acute Exposure Guideline Levels), son valores que representan el umbral de exposición para el público general y son aplicables a periodos de exposición en una emergencia variando de 10 minutos a 8 horas. Los valores fueron determinados para los siguientes tiempos de exposición: 10 y 30 minutos, 1, 4 y 8 horas. Existen tres valores de AEGL los cuales están definidos a continuación (U.S. EPA, 2010):

- AEGL1: es la concentración en el aire, expresada en partes por millón (ppm) o miligramos por metro cúbico (mg/m^3), de una sustancia a partir de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles, puede llegar a experimentar una incomodidad notable e irritación. Sin embargo, estos efectos no incapacitan y son reversibles si cesa la exposición.
- AEGL2: es la concentración llevada por el aire, expresada en ppm o mg/m^3 , de una sustancia a partir de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles, puede experimentar efectos a la salud, serios e irreversibles o un deterioro de la capacidad para escapar.
- AEGL3: es la concentración llevada por el aire, expresada en ppm o mg/m^3 , de una sustancia a partir de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles, puede experimentar efectos de salud que amenacen la vida del individuo o causen la muerte.

7. DESARROLLO DE LINEAMIENTOS Y ANÁLISIS DE CASO EN EVENTOS DE DISPERSIÓN DE NUBES TÓXICAS: CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS

La finalidad de la construcción de escenarios es la formulación y evaluación de situaciones reales de gran probabilidad de ocurrencia, ajustadas al análisis de riesgos mediante la simulación, para el entendimiento y apropiación de conocimiento. Un escenario es el planteamiento de una situación hipotética, que es posible y probable dentro del contexto de emergencias. Para evaluar dicho escenario, se emplean herramientas matemáticas para simular el comportamiento de esta situación en caso de que se presentara bajo las condiciones de interés. En el contexto del presente estudio, serán evaluados incidentes asociados a la fuga y dispersión de sustancias tóxicas más densas que el aire (Nubes tóxicas).

Para la construcción de escenarios se tendrán en cuenta todos los parámetros de entrada que requiere cada uno de los modelos considerados dentro de la herramienta desarrollada en el marco del Convenio especial de cooperación de ciencia y tecnología entre el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá- FOPAE y la Universidad de los Andes para la ejecución del proyecto de Ciencia y Tecnología "Mejoramiento en el conocimiento en riesgo tecnológico – Accidentes industriales mayores en el Distrito Capital. Eventos con nube tóxica/Convenio 453 de 2010".

A continuación se encuentran algunas indicaciones que permitirán hacer la construcción de escenarios para su posterior evaluación:

7.1 Definición de la finalidad

Con el fin de delimitar las posibilidades, es necesario conocer cuál es la finalidad de lo que se va a realizar mediante la simulación para poder hacer una construcción de escenario certera.

La complejidad de los escenarios dependerá de la definición de variables asociadas, así pues, deberán determinarse las variables a medir y las situaciones adecuadas para medirlas. También se tendrán en cuenta tipos de comportamientos y tipos de efectos a evaluar.

Se recomienda que la tarea de construcción de escenarios se realice, en la medida de lo posible, para evaluar situaciones generales y particulares con efectos de interés y no situaciones particulares de baja ocurrencia que carezcan de provecho para su estudio. Esto, con el fin de simular los escenarios de mayor probabilidad de ocurrencia y/o consecuencias, que los cataloguen como prioritarios.

El análisis de consecuencias enmarcado en la dispersión de nubes tóxicas tiene en cuenta tres pasos que se describen en la Figura 7.1 Esquema para el análisis de consecuencias.

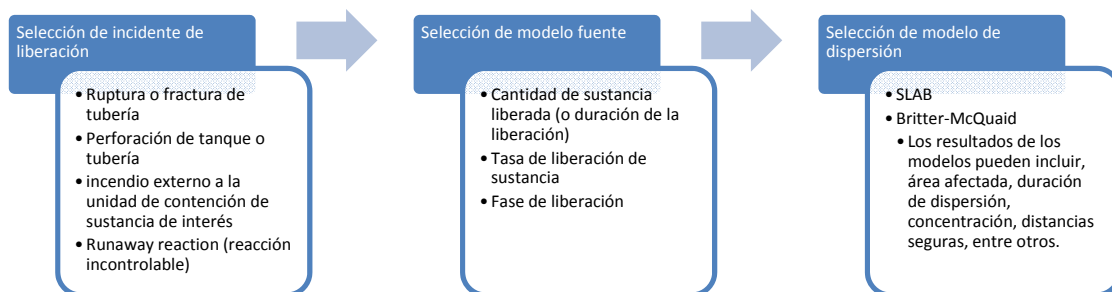


Figura 7.1 Esquema para el análisis de consecuencias

7.2 Escenarios críticos

Los escenarios críticos revelan la peor forma posible en la cual se dará un suceso. La creación y evaluación de escenarios críticos permitirá hacer previsión en la planeación y así, prepararse para la ocurrencia de un evento cuyas características se asemejen a las del escenario planteado.

A continuación se listan algunas de las características que se pueden tener en cuenta para la construcción de escenarios críticos en cuanto a la dispersión de nubes tóxicas (U.S EPA, 2004 & U.S EPA, 1999):

- La selección del tipo de liberación crítica está asociada al estudio de las consecuencias del evento.
- Liberaciones continuas por amplios periodos de tiempo. Estos tiempos deben estar asociados a los tiempos de respuesta de los organismos involucrados en el evento.
- Liberaciones puntuales de grandes cantidades de sustancia tóxica.
- Para estimar la tasa de liberación, se recomienda asumir que la cantidad total de sustancia sea liberada en 10 minutos.

- La altura de la liberación es a nivel del suelo.
- Inexistencia de barreras naturales o artificiales, para que permitan la dispersión de la sustancia de forma libre. (Reducción de turbulencia)
- Asumir una topografía urbana o rural según sea apropiado y en los casos que sea posible. Cuando la liberación está ubicada en un área de pocos edificios u obstrucciones se debe considerar en un área rural; en caso contrario, en locaciones con presencia de edificios, se elige urbano. La selección de un área rural o urbana tiene efectos sobre la turbulencia, la cual es considerada en algunos modelos.
- Velocidades de viento bajas, alrededor de 1.5 m/s o inferiores si la información meteorológica histórica así lo indica. Asociada a estas velocidades de viento debe elegirse una estabilidad atmosférica alta, por ejemplo F (Sección 7.8).
- Asumir una humedad promedio en el ambiente.
- Cuando se desee considerar una atmósfera estable, la cual se ve reflejada en concentraciones mayores, se sugiere emplear la temperatura mínima del ambiente. Si por el contrario se prefiere una atmósfera inestable, donde haya una mayor dispersión del compuesto, se sugiere emplear la máxima temperatura ambiente.
- Para la temperatura de la sustancia en liberación es posible tomar el dato de la temperatura ambiente máxima reportada para los 3 últimos años. También es posible usar la temperatura de proceso si se conoce. Los gases licuados por refrigeración a presión atmosférica se liberan en sus puntos de ebullición, considerando que la temperatura disminuye hasta este valor para alcanzar el equilibrio.
- Ausencia de condiciones de lluvia.
- Existencia de lugares con infraestructura sensible y/o aglomeraciones. Dirección del viento hacia la infraestructura sensible.
- En caso de existir incertidumbres en los valores de los parámetros de entrada del modelo a usar, los valores deben ser elegidos con el fin de exagerar (maximizar) la de liberación de la sustancia (cantidad liberada).
- La construcción del escenario debe realizarse bajo la óptica de un grupo de trabajo con varios actores que proporcionen diversos elementos de valor para el escenario.

Es importante tener en cuenta que todos los escenarios construidos tienen algún nivel de incertidumbre asociado al desconocimiento o poco entendimiento de la geometría del derrame o fuga, de las propiedades físicas, del proceso de fuga, entre otros. Por esta razón es importante considerar parámetros reales o que se ajusten a la realidad de un escenario, así se evitará caer en el

sobredimensionamiento del escenario que suele presentarse cuando se emplean valores conservativos para la construcción del escenario (Crowl, et al., 2002).

7.2.1 Estructura de datos

Para la construcción de un escenario se debe tener claridad sobre la estructura de datos requeridos para poder hacer simulaciones. En este caso, haciendo uso de la herramienta desarrollada, se debe tener en cuenta para cada uno de los modelos una estructura de datos particular.

7.2.2 Modelo SLAB

En el caso del modelo SLAB se requieren 5 grandes grupos dentro de la estructura de datos. La siguiente figura (Figura 7.2) describe cada uno de los grupos:

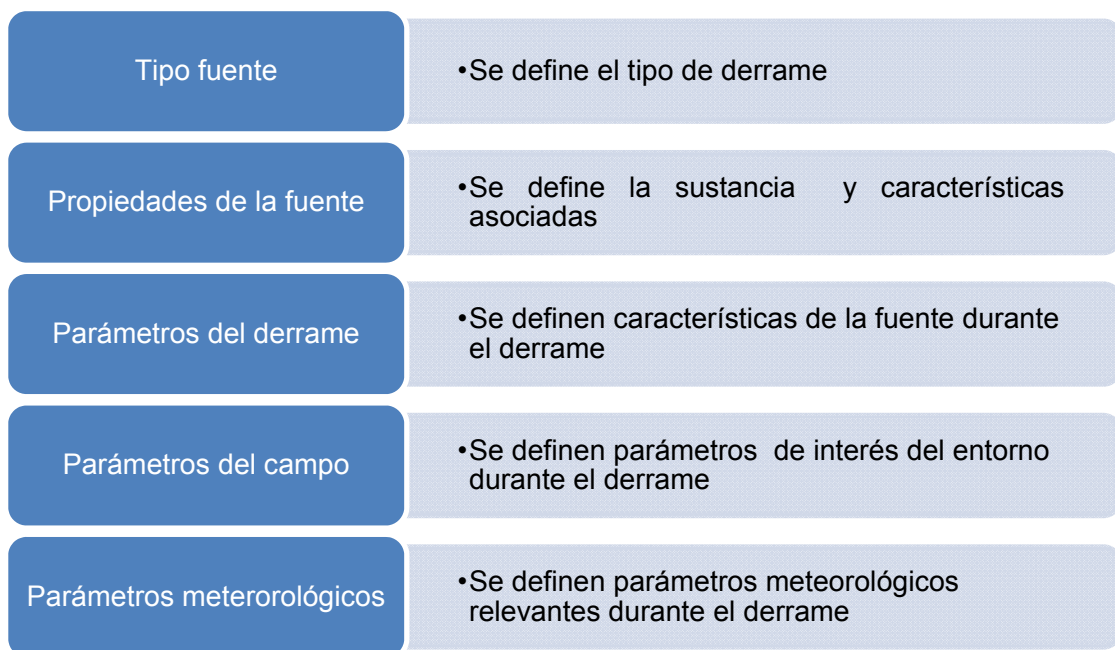




Figura 7.2 Estructura de datos para el modelo SLAB

En la Tabla 7.1, se encuentran los parámetros de entrada necesarios para poder hacer una simulación con el modelo SLAB en la herramienta desarrollada. Todos estos datos deben ser tenidos en cuenta para la construcción del escenario.

Tabla 7.1. Estructura de datos para el modelo SLAB

Tipo de fuente		Descripción	Unidades	Acción
Nombre	Sigla			
Tipo de derrame	IDSPL	-Emisión de una piscina de evaporación -Emisión de un jet horizontal -Emisión de un jet vertical -Instantáneo	Adimensional	Selección del tipo de derrame (Sección 7.3.1)
Parámetro del subpaso numérico	NCALC	El parámetro NCALC es un subpaso entero multiplicador que especifica el número de subpasos de cálculo a cabo de la integración de las ecuaciones de conservación.	Adimensional	Introducción del parámetro del subpaso numérico (Sección 7.3.2)
Propiedades de la fuente		Descripción	Unidades	Acción
Nombre	Sigla			
Nombre del químico		Es posible seleccionarlo de una base de datos que tiene interna la herramienta. En caso de no existir en la base la sustancia de interés debe ser introducido de forma manual.	Adimensional	Selección del químico
Peso molecular del material de la fuente	WMS	Al seleccionar el químico de la base de datos el peso molecular es introducido por el programa automáticamente. En caso de no existir en la base la sustancia de interés debe ser introducido de forma manual	Kg	Al seleccionar la sustancia de la base de datos el WMS queda registrado de manera automática, de lo contrario este parámetro debe ser consultado en tablas disponibles sobre las propiedades del material.

 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

Capacidad calorífica del vapor a presión constante	CPS	Al seleccionar el químico de la base de datos el peso molecular es introducido por el programa automáticamente. En caso de no existir en la base la sustancia de interés debe ser introducido de forma manual	J/kg K	Al seleccionar la sustancia de la base de datos el CPS queda registrado de manera automática, de lo contrario este parámetro debe ser consultado en tablas disponibles sobre las propiedades del material.
Temperatura del punto de ebullición	TBP	Temperatura del punto de ebullición del material en la fuente. Es obtenida automáticamente al seleccionar el compuesto de la base de datos. En caso de no existir en la base la sustancia de interés debe ser introducido de forma manual.	K	Al seleccionar la sustancia de la base de datos el TBP queda registrado de manera automática, de lo contrario este parámetro debe ser consultado en tablas disponibles sobre las propiedades del material.
Fracción másica del líquido inicial	CMEDO	La emisión se asume como una sustancia pura con fracción másica en la fase líquida en forma de gotas de líquido y el resto en la fase de vapor. Para piscinas tiene un valor de 0 y para el resto de fuentes puede variar de 0 a 1.	Adimensional	Introducción del parámetro de fracción másica del líquido inicial (Sección 7.3.3)
Calor de vaporización	DHE	Este valor es obtenido automáticamente al seleccionar el compuesto de la base de datos. En caso de no existir en la base la sustancia de interés debe ser introducido de forma manual.	J/kg	Al seleccionar la sustancia de la base de datos el DHE queda registrado de manera automática, de lo contrario este parámetro debe ser consultado en tablas disponibles sobre las propiedades del material.

Capacidad calorífica del líquido	CPSL	Calor específico de líquido del material en la fuente. Es obtenido automáticamente al seleccionar el compuesto de la base de datos. En caso de no existir en la base la sustancia de interés debe ser introducido de forma manual.	J/kg K	Al seleccionar la sustancia de la base de datos el CPSL queda registrado de manera automática, de lo contrario este parámetro debe ser consultado en tablas disponibles sobre las propiedades del material.
Densidad del líquido del material de la fuente	RHOSL	Este valor es obtenido automáticamente al seleccionar el compuesto de la base de datos. En caso de no existir en la base la sustancia de interés debe ser introducido de forma manual.	kg/m ³	Al seleccionar la sustancia de la base de datos el RHOSL queda registrado de manera automática, de lo contrario este parámetro debe ser consultado en tablas disponibles sobre las propiedades del material.
Primera constante de la presión de saturación	SPB	Este valor es obtenido automáticamente al seleccionar el compuesto de la base de datos. En caso de no existir en la base la sustancia de interés debe ser introducido de forma manual	Adimensional	Al seleccionar la sustancia de la base de datos el SPB queda registrado de manera automática, de lo contrario este parámetro debe ser consultado en tablas disponibles sobre las propiedades del material.
Segunda constante de la presión de saturación	SPC	Es posible seleccionarlo de una base de datos que tiene interna la herramienta. En caso de no existir en la base la sustancia de interés debe ser introducido de forma manual	Adimensional	Este parámetro debe ser consultado en tablas disponibles sobre las propiedades del material.

Parámetros del derrame		Descripción	Unidades	Acción
Nombre	Sigla			
Temperatura del material de la fuente	TS	Cuando la liberación de la sustancia es una piscina evaporándose, la temperatura de la fuente es la temperatura del punto de ebullición. Si la liberación es instantánea, la temperatura de la fuente es la temperatura del material en el instante en que se libera (a excepción de explosiones).	K	Introducción del parámetro de Temperatura del material en la fuente. Para las liberaciones tipo jet o liberaciones instantáneas resultado de explosiones se deben emplear las correlaciones presentadas en la Sección 7.3.4.
Flujo másico de la fuente	QS	No se utiliza cuando la emisión es instantánea. Es la cantidad de sustancia liberada por unidad de tiempo.	kg/s	Introducción del parámetro del flujo másico de la fuente mediante el cálculo (Sección 7.3.5)
Área de la fuente	AS	Para una piscina es el área de la piscina en evaporación. Para el caso de un jet es el área transversal de la fuente después de que se haya expandido completamente.	m ²	Introducción del parámetro de Área de la fuente (Sección 7.4)
Duración de la fuente continua	TSD	Duración del derrame	s	Introducción del parámetro duración de la fuente continua (Sección 7.5)
Masa de la fuente instantánea	QTIS	Masa total de la emisión instantánea. No aplica para fuentes continuas	kg	Introducción del parámetro masa de la fuente instantánea.

Altura de la fuente	HS	Altura de la liberación o derrame.	m	Introducción del parámetro altura de la fuente (Sección 7.6)
Parámetros del Campo		Descripción	Unidades	Acción
Nombre	Sigla			
Tiempo para promediar la concentración	TAV	El tiempo para promediar la concentración es el tiempo apropiado para el estándar de seguridad de interés. Por ejemplo, si estamos interesados en una concentración media de 100 ppm para una exposición después de una hora, el TAV es 3600 segundos.	s	Este parámetro debe ser seleccionado de una lista desplegable interna del programa.
Distancia máxima en la dirección del viento	XFFM	Distancia en la dirección del viento en la que el usuario está interesado en conocer la concentración de la nube.	m	Introducción de la distancia máxima en la que el usuario tiene interés para ubicar una concentración.
Alturas del cálculo de concentración	ZP	Alturas a las cuales se calcula la concentración en función de la distancia en la dirección del viento.	m	Introducción de las alturas
Parámetros Meteorológicos		Descripción	Unidades	Acción
Nombre	Sigla			
Altura de la rugosidad de la superficie	ZO	Este parámetro describe las características de la superficie.	m	Introducción de la altura de la rugosidad de la superficie a partir de los consejos (TIP) del software.

Altura de la medición del ambiente	ZA	Altura a la cual se mide la velocidad del viento del ambiente. Este parámetro debe ser superior a la altura de la rugosidad de la superficie ZO.	m	Introducción de la altura de medición del viento del ambiente.
Velocidad del viento del ambiente	UA	Velocidad media del viento del ambiente a la altura de medición del ambiente sobre el nivel del suelo	m/s	Introducción de la velocidad del viento del ambiente (Sección 7.7)
Temperatura del ambiente	TA	La temperatura del ambiente es la medición climatológica de la temperatura.	K	Introducción de la temperatura del ambiente mensual promedio medida en los alrededores del derrame o de preferencia el dato en tiempo real.
Humedad relativa (%)	RH	Humedad relativa promedio.	Porcentaje	Introducción de la humedad relativa del ambiente medida en un promedio anual o de preferencia el dato en tiempo real.
Valores de la clase de estabilidad	STAB	Valores que describen la estabilidad del ambiente mediante el esquema estándar de la estabilidad de Pasquill-Gifford	Adimensional	Selección en lista desplegable un valor para la clase de estabilidad. Para poder hacer una selección acertada es posible consultar la Sección 7.8.
Inverso de la longitud de Monin-Obukhov	ALA	Es un parámetro de entrada que se calcula cuando no se selecciona ningún valor para la clase de estabilidad	(1/m)	La selección en lista desplegable de los valores de la clase de estabilidad desencadena el cálculo de este parámetro.

7.2.3 Modelo Britter-McQuaid

En el caso del modelo Britter-McQuaid se requieren 4 grandes grupos dentro de la estructura de datos. La siguiente figura (Figura 7.3) describe cada uno de los grupos:

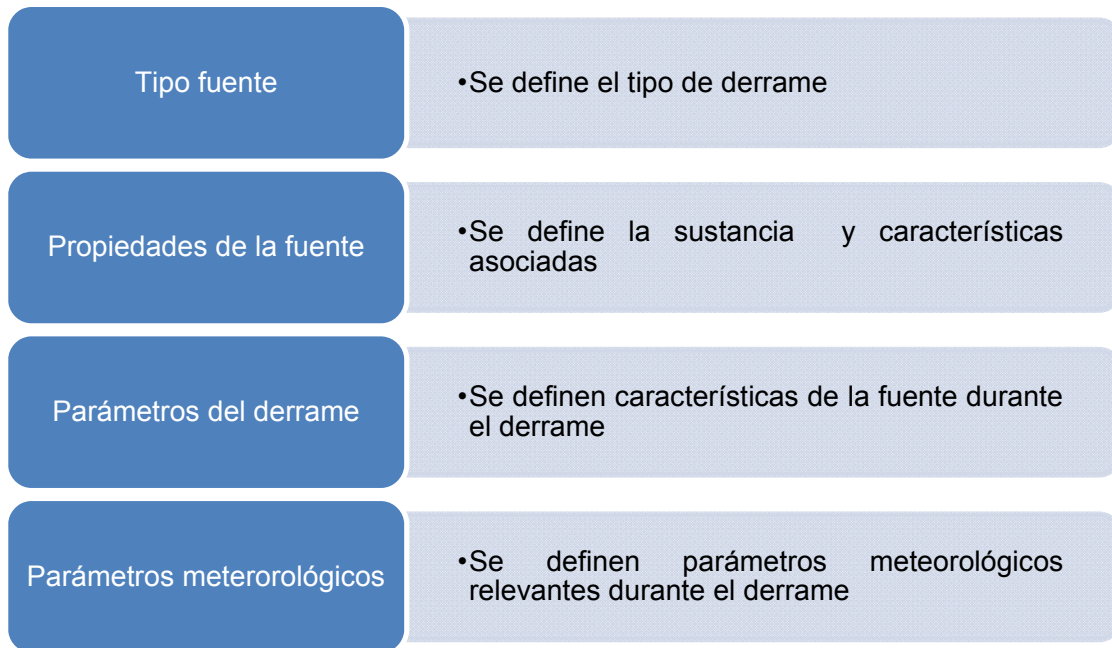


Figura 7.3 Estructura de datos para el modelo Britter-McQuaid

En la Tabla 7.2, se encuentran los parámetros de entrada necesarios para poder hacer una simulación con el modelo Britter-McQuaid en la herramienta desarrollada. Todos estos datos deben ser tenidos en cuenta para la construcción del escenario.



 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

Tabla 7.2. Estructura de datos para el modelo Britter-McQuaid

Tipo de fuente		Descripción	Unidades	Acción
Nombre	Sigla			
Tipo de derrame	IDSPL	- Emisión continua - Emisión instantánea	Adimensional	Selección del tipo de derrame (Sección 7.3.1)
Propiedades de la fuente		Descripción	Unidades	Acción
Nombre	Sigla			
Nombre del químico		Es posible seleccionarlo de una base de datos que tiene interna la herramienta. En caso de no existir en la base la sustancia de interés debe ser introducido de forma manual	Adimensional	Selección del químico.
Densidad característica del material de la fuente	RHO	Densidad de la fuente. Es posible seleccionarlo de una base de datos que tiene interna la herramienta. En caso de no existir en la base la sustancia de interés debe ser introducido de forma manual	kg/m ³	Al seleccionar la sustancia de la base de datos el RHO queda registrado de manera automática, de lo contrario este parámetro debe ser consultado en tablas disponibles sobre las propiedades del material.
Parámetros del derrame		Descripción	Unidades	Acción
Nombre	Sigla			
Temperatura del material de la	TS	Cuando la liberación de la sustancia es una piscina evaporándose, la temperatura de la fuente	K	Introducción del parámetro de Temperatura del material en la fuente.

fuelle		es la temperatura del punto de ebullición. Cuando la liberación es instantánea, la temperatura de la fuente es la temperatura del material en el instante en que se libera.		Para las liberaciones tipo jet se debe emplear las correlaciones presentadas en la Sección 7.3.4.
Flujo volumétrico de la fuente	QT	No se utiliza cuando la emisión es instantánea. Es la cantidad de sustancia liberada por segundo de emisión	m ³ /s	Introducción del parámetro del flujo volumétrico de la fuente a partir del cálculo de la Sección 7.3.5
Radio de la fuente	R	Para la emisión de una piscina evaporándose, el radio de la fuente corresponde al radio de la piscina de evaporación. Para emisiones tipo jet, es el radio de la fuente después de que se haya expandido completamente.	m	Introducción del parámetro Radio de la fuente mediante el cálculo del Área de la fuente (Sección 7.4) Posterior a esto se asume que área es circular y se determina el radio.
Parámetros Meteorológicos		Descripción	Unidades	Acción
Nombre	Sigla			
Densidad característica del aire del ambiente	RHOA	Densidad del aire del ambiente	kg/m ³	Este parámetro debe ser medido en campo. De lo contrario debe ser tomado un valor de referencia y corregido por presión.

Velocidad del viento del ambiente (m/s)	UA	Velocidad media del viento del ambiente a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo		Introducción de la velocidad del viento del ambiente (Sección 7.7)
---	----	--	--	--

Adicional a los datos de entrada requeridos por cada uno de los modelos en la herramienta de simulación, se requiere de un punto de ocurrencia (epicentro) y la dirección del viento en dicho punto. Estos datos serán utilizados con el fin de ubicar geográficamente los resultados de la simulación en el reporte (Sección 4).

7.3 Obtención de parámetros de entrada

7.3.1 Tipo de derrame

En SLAB es posible seleccionar una emisión de una piscina de evaporación (estado: vapor), una emisión de un jet horizontal (estado: vapor o mezcla vapor/gotas de líquido), una emisión de un jet vertical (estado: vapor o mezcla vapor/gotas de líquido) o un derrame instantáneo/piscina de evaporación de corta duración (estado: vapor o mezcla vapor/gotas de líquido).

Una piscina se da a nivel del suelo y tiene un tiempo de evaporación finito (Duración de la fuente continua TSD). Si la piscina tiene una duración corta esta puede ser considerada una emisión instantánea.

En Britter-McQuiaid es posible seleccionar una fuente continua o una instantánea sin especificar un tipo en especial.

7.3.2 Parámetro del subpaso numérico

El subpaso numérico es un multiplicador entero, que determina el número de pasos que se realizarán durante la integración de las ecuaciones de conservación incluidas en la programación de los modelos. Este valor debe ser introducido por el usuario. Se recomienda utilizar un valor de 1, puesto que este proporciona estabilidad y precisión (Ermak, 1990). Sin embargo, el programa puede no arrojar los perfiles de concentración al emplear este valor. En este caso, este debe ser incrementado gradualmente hasta obtener resultados confiables; es decir, hasta que los perfiles de concentración arrojados reflejen el cambio de concentración de la sustancia en función de la distancia.

Si por ejemplo se utiliza un valor de 2; esto duplica el número de subpasos numéricos, divide en 2 el paso de integración y aumenta en la misma proporción el tiempo de simulación (Ermak, 1990).

7.3.3 Fracción másica del líquido inicial

Esta fracción hace referencia a la fracción del líquido que ingresa a la atmósfera durante la emisión. La fracción másica del líquido es especificada por el usuario y automáticamente el programa calcula la fracción másica de vapor.

Una piscina de evaporación tiene una fracción másica inicial de cero (0), un jet o una fuente instantánea pueden incluir alguna fracción másica inicial diferente de cero. Una mezcla de líquido/vapor se forma cuando el material (en forma líquida) se almacena bajo presión a una temperatura por encima del punto de ebullición del material y éste es liberado rápidamente. En este caso la fracción másica del vapor (f_v) puede ser calculada mediante la Ecuación 7.90 y será posible obtener la fracción másica del líquido inicial de la Ecuación 7.1.

$$f_l = 1 - f_v$$

Ecuación 7.1

Si la temperatura (T_0) de almacenamiento es menor o igual al punto de ebullición (T_b), el material liberado será un líquido puro y se presume que forme una piscina de evaporación en el suelo.¹⁸

7.3.4 Temperatura del material en la fuente

Esta temperatura depende del tipo de liberación. Cuando la liberación de la sustancia es una piscina evaporándose, la temperatura del material en la fuente es la temperatura del punto de ebullición. Si la liberación es instantánea, la temperatura de la fuente es la temperatura del material en el instante en que se libera, a menos que la liberación instantánea sea el resultado de una explosión. En este último caso o cuando la fuente sea un jet, la temperatura del material en la fuente es la temperatura del material luego que éste se ha expandido por completo y la presión se ha reducido a una atmósfera.

¹⁸ En este caso se recomienda que se seleccione como tipo de derrame una piscina de evaporación y la fracción másica del líquido inicial sea cero.

Cuando el material es almacenado como vapor a presión y liberado como vapor se recomienda que el proceso sea asumido como adiabático. En este caso, la temperatura del material en la fuente se calcula mediante la Ecuación 7.2.

$$TS = \left(\frac{1}{\gamma}\right) \left[1 + (\gamma - 1) \left(\frac{P_a}{P_{almacenamiento}} \right) \right] T_0 \quad \text{Ecuación 7.2}$$

Si la temperatura calculada mediante la Ecuación 7.2 es inferior al punto de ebullición, la temperatura del material en la fuente debe ser introducida al modelo con el valor de la temperatura de punto de ebullición. La temperatura del material en la fuente debe ser igual o mayor al punto de ebullición.

Si la liberación se da en dos fases (líquido/vapor) la temperatura del material en la fuente debe asumirse como la temperatura del punto de ebullición de la sustancia.

Se emplea la temperatura del punto de ebullición puesto que por las características de liberación, la sustancia alcanza el punto de equilibrio a presión atmosférica, disminuyendo su temperatura a la temperatura de ebullición.

7.3.5 Flujo másico de la fuente

El flujo másico es la cantidad de sustancia liberada durante un tiempo determinado de una fuente continua. La liberación puede ser una piscina de evaporación, un jet o una piscina de corta duración. Para una emisión instantánea, esta valor es igual a cero (0).

El cálculo del flujo másico de cualquier fuente es posible realizarse mediante los modelos fuente que se describen a continuación, para gases, líquidos y mezclas de dos fases.

7.3.6 Modelos Fuente

La información contenida en esta sección corresponde a la descripción presentada por **(Crowl, et al., 2002)** para determinar las tasas de emisión y parámetros relacionados con las posibles fuentes de emisión de gases tóxicos.

Los accidentes inician con incidentes que usualmente resultan en la pérdida de contención de materiales en alguna etapa de proceso. Los accidentes típicos

pueden incluir la fisura o ruptura de una tubería, la perforación de un tanque de almacenamiento o de una tubería o episodios de incendio externos a las unidades que contienen sustancias.

Una vez sucedido un incidente, los modelos fuente son útiles para describir la forma en la cual las sustancias contenidas son liberadas (Figura 7.4). Los modelos fuente proveen información sobre: tasa de liberación, cantidad total de sustancia liberada, tiempo total de descarga y estado de la sustancia descargada (sólido, líquido, vapor, o una combinación de ellos).

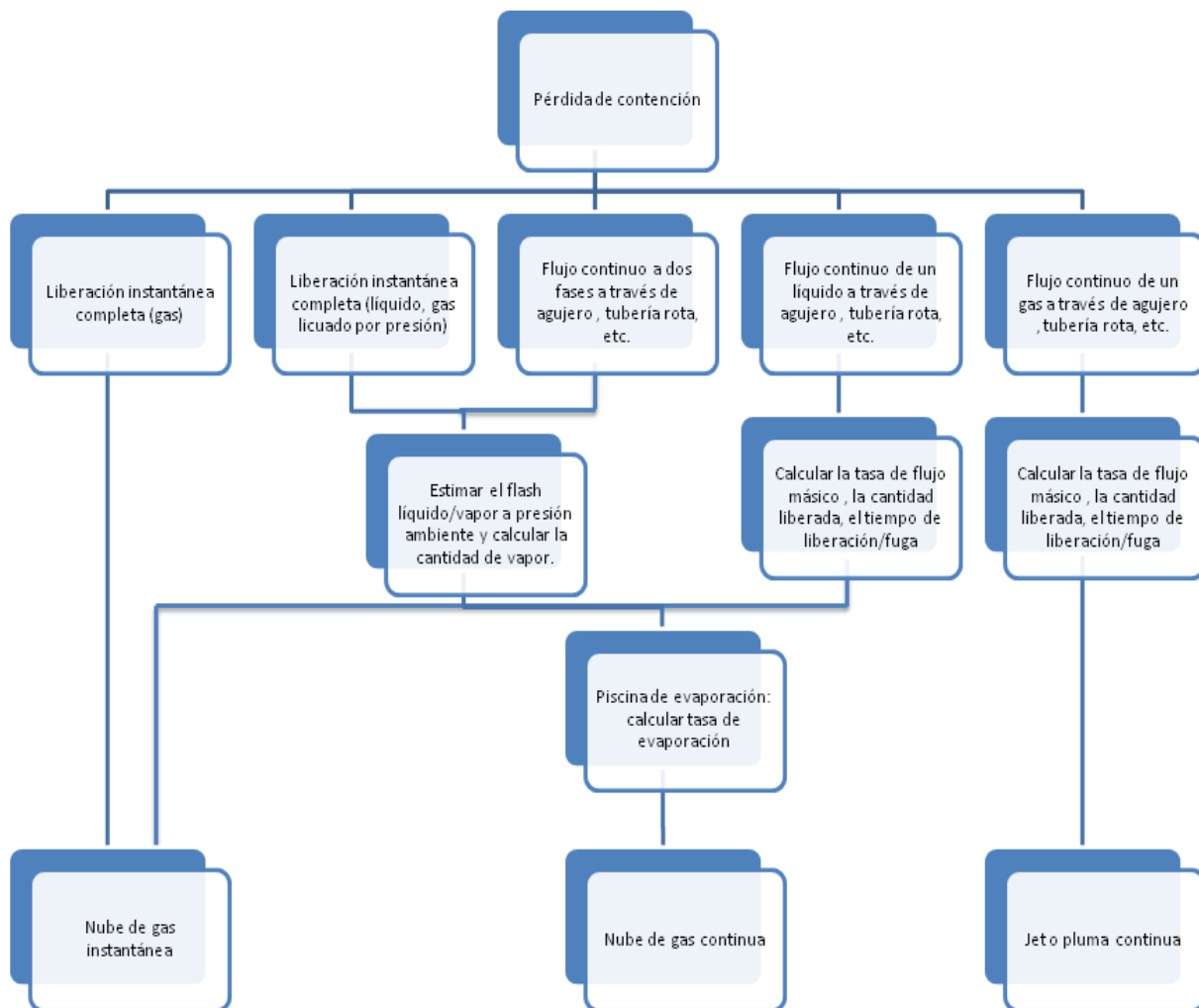


Figura 7.4 Esquema de pérdida de contención y fuentes asociadas. Adaptado de (Casal, 2008 p. 20)

Posterior a conocer estos datos en un incidente, es posible utilizar modelos de dispersión para conocer la forma en la cual el material es transportado y disipado hasta ciertos niveles de concentración, cuyos valores pueden ser de interés público. El conocimiento de estos fenómenos se traduce en la reducción y mitigación de efectos potenciales en la ocurrencia de accidentes reales.

“Los modelos fuente están contruidos a partir de ecuaciones fundamentales o empíricas que representan procesos fisicoquímicos que ocurren durante la liberación de materiales” (Crowl, et al., 2002 p. 109).

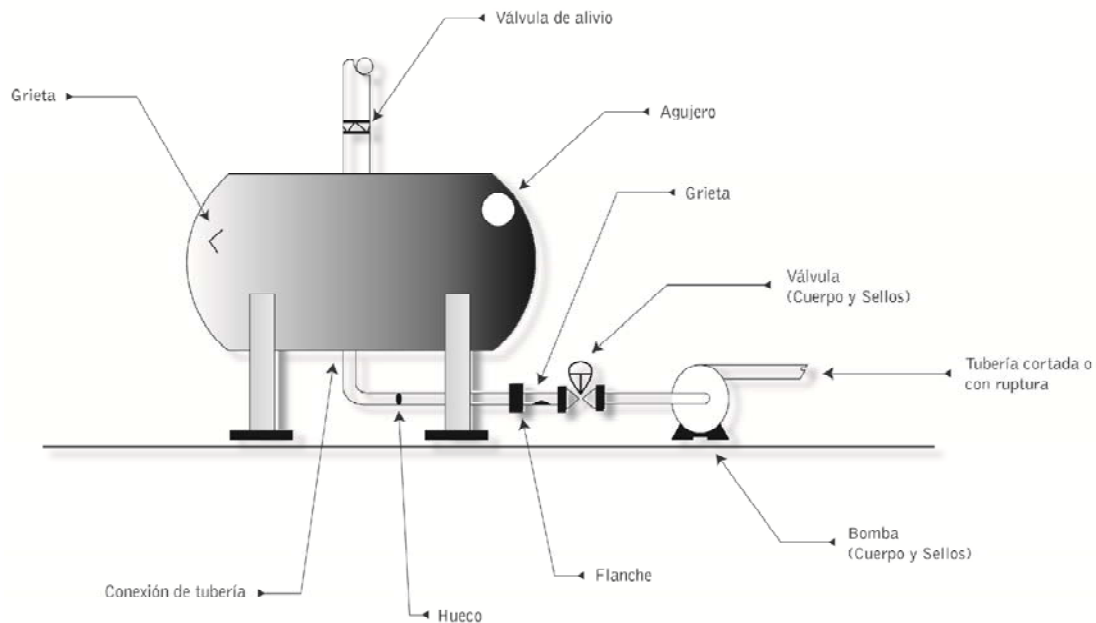


Figura 7.5 Varios tipos de mecanismos de liberación limitada. Adaptado de (Crowl, et al., 2002 p. 111)

Los mecanismos de liberación se clasifican en dos grupos: de amplia liberación y de limitada liberación. Los mecanismos de amplia liberación se caracterizan por presentar un gran agujero en alguna unidad de proceso, liberando cantidades considerables de material en un corto periodo de tiempo.

En el caso de mecanismos de liberación limitada (Figura 7.5), el material es liberado a una tasa lenta, tal que las condiciones “aguas arriba” no son afectadas de forma inmediata; en este caso se hace válida la suposición que la presión “aguas arriba” es constante. Este tipo de liberaciones se da en pequeños agujeros

o grietas en tuberías y tanques, filtraciones en válvulas y bombas y en tuberías rotas o cortadas. Los sistemas de alivio, creados con el fin de evitar sobrepresiones en unidades de proceso, son también potenciales fuentes de liberación de materiales.

Dependiendo del estado y las condiciones en las cuales se encuentra almacenado el material se ve afectada la forma en la cual el material es liberado. Los gases y vapores almacenados en tanques se liberan en forma de jet de gas o vapor. En el caso de líquidos, una fuga por debajo del nivel del cual está almacenado produce una corriente de líquido escapando. Si el líquido es almacenado bajo presión por encima de su punto de ebullición a nivel atmosférico, una fuga por debajo del nivel del líquido resultará en una corriente de fuga líquida que cambiaría parcialmente de estado a vapor. Pequeñas gotas de líquido o aerosoles pueden formarse de una corriente de este tipo, con la posibilidad de ser transportadas lejos de la fuente por efectos de corrientes de viento. Una fuga en el espacio de vapor, por encima del líquido, puede resultar en una fuga de vapor o de vapor de dos fases, compuesta por vapor y líquido, dependiendo de las propiedades del material.

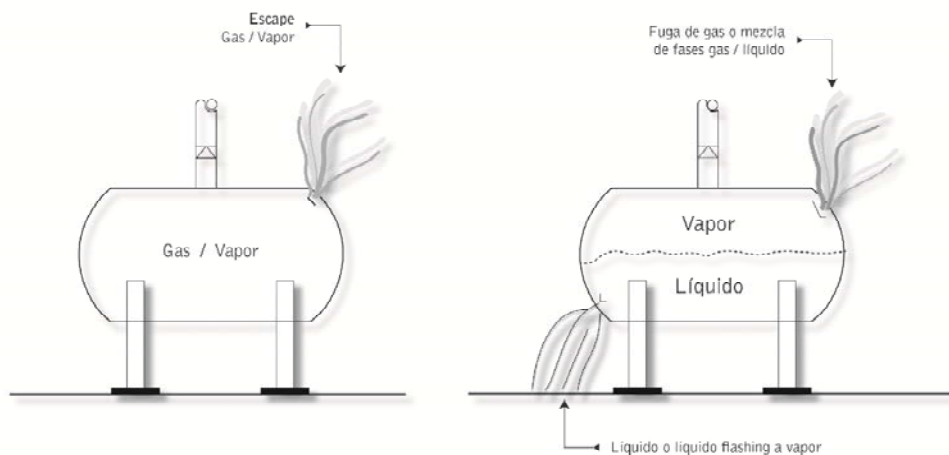


Figura 7.6 Vapor y líquido expulsados de unidades de proceso en una o dos fases. Adaptado de (Crowl, et al., 2002 p. 112)

A continuación se describirán y desarrollarán algunos modelos fuente que son usados de forma general. Cabe aclarar que algunos casos particulares requieren la adaptación del modelo fuente a las condiciones del incidente que se presente.

7.3.6.1 Liberación líquida

a) Flujo de líquido a través de un agujero

Un balance de energía mecánica describe varias formas de energía asociadas a fluidos en circulación:

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left(\frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = -\frac{W_s}{\dot{m}} \quad \text{Ecuación 7.3}$$

Donde:

- P Presión (fuerza/área).
- ρ Densidad del fluido (masa/volumen).
- \bar{u} Velocidad instantánea promedio del fluido (distancia/tiempo).
- g_c Constante gravitacional (longitud masa/fuerza tiempo).
- α Factor adimensional de corrección del perfil de velocidad. Puede tomar los siguientes valores: $\alpha = 0.5$ para flujo laminar,¹⁹ $\alpha = 1$ para flujo tapón o pistón, y $\alpha \rightarrow 1$ para flujo turbulento.
- g Aceleración de la gravedad (longitud/tiempo).
- z Altura por encima del nivel de referencia (datum) (longitud).
- F Término de pérdidas netas por fricción (longitud fuerza/masa).
- W_s Trabajo mecánico (fuerza longitud).
- \dot{m} Tasa de flujo másico (masa/tiempo).

La función Δ representa la diferencia ente el estado final y el estado inicial.

Para líquidos incompresibles la densidad es constante y se tiene que:

$$\int \frac{dP}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad \text{Ecuación 7.4}$$

¹⁹ Flujo laminar: Flujo ordenado y suave

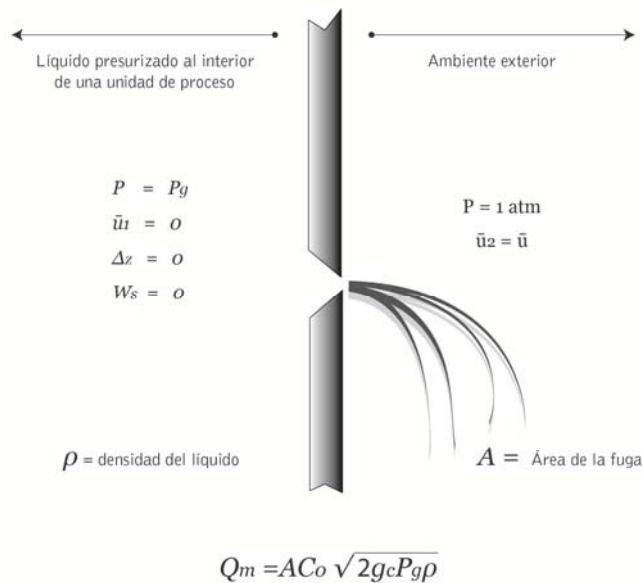


Figura 7.7 Líquido escapando a través de un agujero en una unidad de proceso. Adaptado de (Crowl, et al., 2002 p. 114)

Considere un proceso como el que se muestra en la figura anterior. La presión del líquido contenido en la unidad de proceso es convertida en energía cinética a medida que el líquido se escapa a través del punto de fuga. Fuerzas de fricción entre el líquido y la pared de fuga convierten alguna energía cinética del líquido en energía térmica haciendo que la velocidad de fuga se vea reducida.

Para una liberación de este tipo (limitada), se asume constante la presión manométrica P_g dentro de la unidad. La presión externa es atmosférica; por lo que $\Delta P = P_g$. El trabajo mecánico es cero y la velocidad del fluido dentro de la unidad de proceso puede considerarse despreciable. El cambio en la elevación del fluido durante la descarga del material a través del agujero también puede considerarse despreciable, por lo cual $\Delta z = 0$. Las pérdidas por fricción en la liberación son aproximadas por un coeficiente de descarga constante C_1 , definido como:

$$-\frac{\Delta P}{\rho} - F = C_1^2 \left(-\frac{\Delta P}{\rho} \right) \quad \text{Ecuación 7.5}$$

Si las modificaciones se sustituyen en la Ecuación 7.3 para determinar \bar{u} , tenemos entonces que la velocidad promedio de la descarga en el punto de fuga es:

$$\bar{u} = C_1 \sqrt{\alpha} \sqrt{\frac{2g_c P_g}{\rho}} \quad \text{Ecuación 7.6}$$

Entonces, un nuevo coeficiente de descarga C_0 , es definido como,

$$C_0 = C_1 \sqrt{\alpha} \quad \text{Ecuación 7.7}$$

Así, la ecuación resultante para la velocidad del fluido saliendo del punto de fuga es:

$$\bar{u} = C_0 \sqrt{\frac{2g_c P_g}{\rho}} \quad \text{Ecuación 7.8}$$

La tasa de flujo másico Q_m proveniente de un agujero de área A está dada por:

$$Q_m = \rho \bar{u} A = A C_0 \sqrt{2g_c P_g \rho} \quad \text{Ecuación 7.9}$$

La masa total de líquido derramado depende del tiempo total en el cual la fuga esté activa. El coeficiente de descarga C_0 es una función del número de Reynolds del fluido escapando y del diámetro del agujero.

Las siguientes directrices son recomendadas:

- Para agujeros con bordes afilados y para números de Reynolds mayores a 30000, C_0 se aproxima al valor de 0.61, para estas condiciones la velocidad de salida del fluido es independiente del tamaño del agujero.
- Para una boquilla redondeada, el coeficiente de descarga se aproxima a 1.
- Para secciones pequeñas de una tubería unida a un recipiente (con una relación longitud-radio no menor a 3), el coeficiente de descarga es aproximadamente 0.81.
- Cuando un coeficiente de descarga es incierto o desconocido, se usa un valor de 1 para maximizar los cálculos de flujo asociados.

b) Flujo de líquido a través de un agujero en un tanque

Un tanque de almacenamiento (Figura 7.8) es perforado a una altura h_L por debajo del nivel del fluido contenido en él. El flujo del líquido a través del agujero está representado por el balance de energía (Ecuación 7.3) y se asume que un líquido incompresible está contenido como se mostró en la Ecuación 7.4.

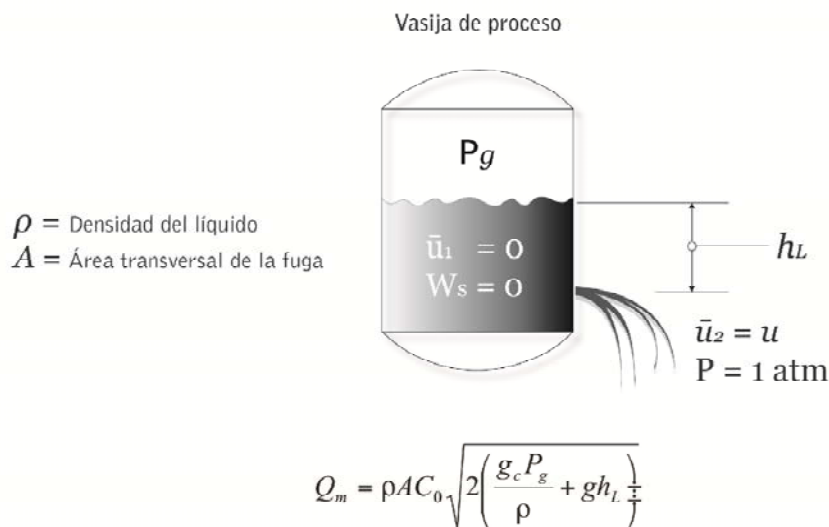


Figura 7.8 Liberación por orificio en una vasija de proceso. Adaptado de (Crowl, et al., 2002 p. 116)

La presión manométrica dentro del tanque es P_g , y la presión externa al tanque es la presión atmosférica, o cero. El trabajo W_s es cero, y la velocidad del fluido en el tanque es cero.

El coeficiente adimensional de descarga C_1 , se define como:

$$-\frac{\Delta P}{\rho} - \frac{g}{g_c} \Delta z - F = C_1^2 \left(-\frac{\Delta P}{\rho} - \frac{g}{g_c} \Delta z \right) \quad \text{Ecuación 7.10}$$

El balance de energía mecánica (Ecuación 7.3) se resuelve para \bar{u} , la velocidad de descarga instantánea promedio de la fuga:

$$\bar{u} = C_1 \sqrt{\alpha} \sqrt{2 \left(\frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L \right)} \quad \text{Ecuación 7.11}$$

Donde h_L es la altura del líquido por encima del punto de fuga. Un nuevo coeficiente de descarga C_0 es definido como:

$$C_0 = C_1 \sqrt{\alpha} \quad \text{Ecuación 7.12}$$

Al reemplazar la Ecuación 7.12 en la Ecuación 7.11, tenemos la siguiente ecuación (Ecuación 7.13) para la velocidad instantánea del fluido saliendo del punto de fuga.

$$\bar{u} = C_0 \sqrt{2 \left(\frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L \right)} \quad \text{Ecuación 7.13}$$

Entonces, tenemos que el flujo másico instantáneo Q_m de una fuga en un agujero de área A está dado por (Ecuación 7.14):

$$Q_m = \rho \bar{u} A = \rho A C_0 \sqrt{2 \left(\frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L \right)} \quad \text{Ecuación 7.14}$$

A medida que el tanque se desocupa, la altura del líquido contenido en él decrece, así como la velocidad de flujo y la tasa de flujo másico. Se asume que la presión manométrica P_g en la superficie del líquido es constante. Esto ocurriría si la vasija de proceso fuera rellena con un gas inerte con el ánimo de prevenir explosiones o si fuera ventilada a la atmósfera. Para un tanque de área transversal constante A_t , la masa total de líquido en el tanque por encima del punto de fuga es:

$$m = \rho A_t h_L \quad \text{Ecuación 7.15}$$

Entonces, la tasa de cambio de la masa dentro del tanque es como se muestra en la Ecuación 7.15, donde Q_m está dado por la Ecuación 7.14.

$$\frac{dm}{dt} = -Q_m \quad \text{Ecuación 7.16}$$

Sustituyendo las Ecuaciones 7.14 y 7.15 en la Ecuación 7.16, y asumiendo que la sección transversal del tanque es constante así como la densidad del líquido, es posible obtener una ecuación diferencial que represente el cambio de la altura del fluido:

$$\frac{dh_L}{dt} = -\frac{AC_0}{A_t} \sqrt{2\left(\frac{g_c P_g}{\rho} + gh_L\right)} \quad \text{Ecuación 7.17}$$

La Ecuación 7.17 es manipulada con el fin de poder integrarla de una altura inicial h_L^0 a cualquier altura h_L :

$$\int_{h_L^0}^{h_L} \frac{dh_L}{\sqrt{2\left(\frac{g_c P_g}{\rho} + gh_L\right)}} = -\frac{AC_0}{A_t} \int_0^t dt \quad \text{Ecuación 7.18}$$

Resolviendo la Ecuación 7.18 se tiene que:

$$\frac{1}{g} \sqrt{2\left(\frac{g_c P_g}{\rho} + gh_L\right)} - \frac{1}{g} \sqrt{2\left(\frac{g_c P_g}{\rho} + gh_L^0\right)} = -\frac{AC_0}{A_t} t \quad \text{Ecuación 7.19}$$

Resolviendo la Ecuación 7.19 para h_L , el nivel del líquido en el tanque resulta:

$$h_L = h_L^0 - \frac{AC_0}{A_t} \sqrt{2\left(\frac{g_c P_g}{\rho} + gh_L^0\right)} t + \frac{g}{2} \left(\frac{AC_0}{A_t} t\right)^2 \quad \text{Ecuación 7.20}$$

Si se sustituye la Ecuación 7.20 en la Ecuación 7.14 es posible obtener la tasa de descarga de masa en cualquier tiempo t :

$$Q_m = \rho \bar{u} A = \rho A C_0 \sqrt{2 \left(\frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L^0 \right)} - \frac{\rho g C_0^2 A^2}{A_t} t \quad \text{Ecuación 7.21}$$

El primer término, al lado derecho de la Ecuación 7.21, es la tasa de masa de descarga inicial cuando $h_L = h_L^0$. El tiempo de vaciado t_e , en el cual el nivel del líquido alcanza el punto de fuga en la vasija de proceso, puede hallarse resolviendo la Ecuación 7.20 para t estableciendo que $h_L = 0$ se obtiene (Ecuación 7.22):

$$t_e = \frac{1}{C_0 g} \left(\frac{A_t}{A} \right) \left[\sqrt{2 \left(\frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L^0 \right)} - \sqrt{\frac{2 g_c P_g}{\rho}} \right] \quad \text{Ecuación 7.22}$$

Si la vasija se encuentra a presión atmosférica, la presión manométrica es cero $P_g = 0$, por lo cual la Ecuación 7.22 queda reducida de la siguiente forma:

$$t_e = \frac{1}{C_0 g} \left(\frac{A_t}{A} \right) \sqrt{2 g h_L^0} \quad \text{Ecuación 7.23}$$

La ecuación general que representa el tiempo de drenaje para cualquier geometría de vasija de proceso se muestra a continuación (Ecuación 7.24). Se asume que el espacio que está por encima del líquido está a presión atmosférica. Así, combinando las Ecuaciones 7.14 y 7.16 obtenemos lo siguiente:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} = -\rho A C_0 \sqrt{2 g h_L} \quad \text{Ecuación 7.24}$$

Reorganizando los términos de la ecuación e integrando obtenemos las ecuaciones 7.25 y 7.26.

$$-\frac{1}{AC_0\sqrt{2g}} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{\sqrt{h_L}} = \int_0^t dt$$

Ecuación 7.25

$$t = -\frac{1}{AC_0\sqrt{2g}} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{\sqrt{h_L}}$$

Ecuación 7.26

La Ecuación 7.26 es el resultado de la ecuación general para el tiempo de drenaje para cualquier geometría de vasija de proceso.

En el caso de una vasija en forma de cilindro vertical, tenemos

$$dV = \frac{\pi D^2}{4} dh_L$$

Ecuación 7.27

Si la Ecuación 7.27 es sustituida en la Ecuación 7.26, se obtiene

$$t = \frac{\pi D^2}{4AC_0\sqrt{2g}} \int \frac{dh_L}{\sqrt{h_L}}$$

Ecuación 7.28

En caso que el agujero de fuga se encuentre en el fondo de la vasija, entonces, la Ecuación 7.28 es integrada desde una altura $h=0$ a una altura $h=h_0$. Por medio de esta suposición es posible obtener el tiempo de vaciado de la vasija.

$$t_e = \frac{\pi D^2/4}{AC_0} \sqrt{\frac{2h_L^0}{g}} = \frac{1}{C_0g} \left(\frac{\pi D^2/4}{A} \right) \sqrt{2gh_L^0}$$

Ecuación 7.29

Esta ecuación (Ecuación 7.29) es comparable con la Ecuación 7.23.

c) Flujo de líquidos a través de tuberías

En la Figura 7.9 se muestra una tubería que transporta una sustancia líquida. Un gradiente de presión a través de la tubería es la fuerza motriz para que el líquido

fluya a través de ella. Fuerzas de fricción entre el líquido y la superficie de la tubería convierten energía cinética en energía térmica. Este hecho se traduce en una velocidad de flujo y presión del líquido decrecientes a lo largo de la tubería.

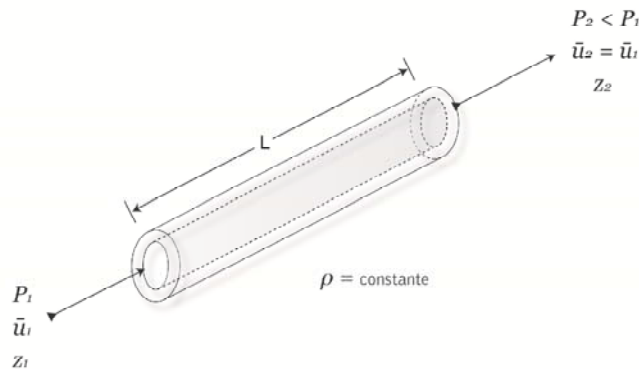


Figura 7.9 Líquido fluyendo a través de una tubería. Adaptado de (Crowl, et al., 2002 p. 121)

El flujo de líquidos incompresibles a través de tuberías se describe con el balance de energía mecánica mostrado en la Ecuación 7.3, que, combinado con la asunción de incompresibilidad descrita en la Ecuación 7.4 resulta en:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta \bar{u}^2}{2\alpha g_c} + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = -\frac{W_s}{\dot{m}} \quad \text{Ecuación 7.30}$$

El término de pérdidas por fricción F en la Ecuación 7.30 representa las pérdidas de energía mecánica como resultado de interacciones de fuerzas de fricción e incluye las pérdidas derivadas del flujo a través de tramos y accesorios de la tubería tales como válvulas, codos, orificios y entradas y salidas de tubería. Para cada tipo de accesorio o tramo causando fricción debe utilizarse un término de pérdidas, así:

$$F = K_f \left(\frac{u^2}{2g_c} \right) \quad \text{Ecuación 7.31}$$

Donde, K_f es la pérdida de carga superior debido a la instalación de tuberías o tubos (adimensional) y u es la velocidad del fluido (longitud / tiempo)

Tabla 7.3. Factor de rugosidad ε para tuberías limpias²⁰

Material de la tubería	ε (mm)
Acero remachado	1 a 10
Concreto	0,3 a 3
Hierro fundido	0,26
Hierro galvanizado	0,15
Acero comercial	0,046
Hierro forjado	0,046
Drawn tubing	0,0015
Vidrio	0
Plástico	0

Para líquidos que fluyen a través de tuberías, el término de exceso de pérdidas K_f viene dado por:

$$K_f = \frac{4fL}{d} \quad \text{Ecuación 7.32}$$

Donde f es el factor de fricción de Fanning (adimensional), L es la longitud de flujo (longitud) y d es el diámetro de la trayectoria del flujo (longitud).

El factor de fricción de Fanning f es una función del número de Reynolds Re y de la rugosidad del tubo ε . La Tabla 7.3 provee valores de ε para varios tipos de tuberías limpias. La Figura 7.10 muestra el factor de fricción de Fanning versus el número de Reynolds con la rugosidad de la tubería, ε/d , como un parámetro.

²⁰Tomado de (Crowl, et al., 2002 p. 122) Seleccionado de Octave Levenspiel, *Engineering Flow and Heat Exchange* (New York: Plenum Press, 1984), pág. 22

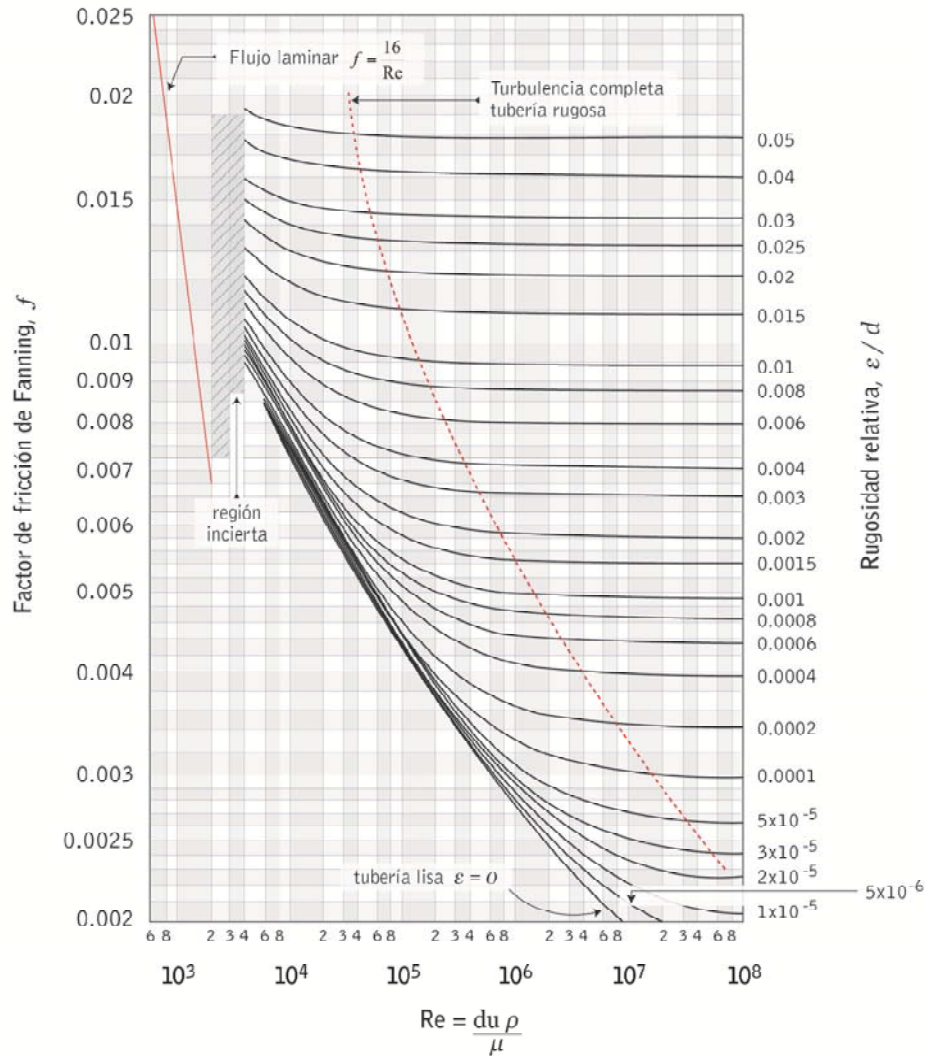


Figura 7.10 Gráfica del factor de fricción de Fanning f versus el número de Reynolds. Fuente: Octave Leven-spiel, *Engineering Flow and Heat Exchange* (New York: Plenum Press, 1984), p. 20. Tomado de (Crowl, et al., 2002 p. 121)

Para flujo laminar, el factor de fricción de Fanning está dado por:

$$f = \frac{16}{Re}$$

Ecuación 7.33

Para el caso de flujo turbulento, los datos que se muestran en la Figura 7.10 están representados por la ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left(\frac{1}{3.7} \frac{\varepsilon}{d} + \frac{1.255}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 7.34}$$

Una forma alternativa de la Ecuación 7.34, para determinar el número de Reynolds a partir del factor de fricción f es:

$$\frac{1}{\text{Re}} = \frac{\sqrt{f}}{1.255} \left(10^{-0.25/\sqrt{f}} - \frac{1}{3.7} \frac{\varepsilon}{d} \right) \quad \text{Ecuación 7.35}$$

Para flujo turbulento completamente desarrollado en tuberías rugosas, f es **independiente** del número de Reynolds, así como lo demuestran los factores de fricción casi constante para un valor alto del número de Reynolds como se muestra en la Figura 7.10. Para este caso la Ecuación 7.35 se simplifica a:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \log \left(3.7 \frac{d}{\varepsilon} \right) \quad \text{Ecuación 7.36}$$

Para tuberías lisas, $\varepsilon = 0$ y la Ecuación 7.34 se reduce a:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \log \frac{\text{Re} \sqrt{f}}{1.255} \quad \text{Ecuación 7.37}$$

Para una tubería lisa con un número de Reynolds inferior a 100.000 es posible utilizar la siguiente aproximación de Blasius²¹ para la Ecuación 7.37:

$$f = 0.079 \text{Re}^{-1/4} \quad \text{Ecuación 7.38}$$

²¹ Hace referencia al uso de una capa límite para el flujo

Una sola ecuación ha sido propuesta por Chen para proporcionar el factor de fricción f en todo el rango de números de Reynolds que se muestra en la Figura 7.10.

Esta ecuación es:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left(\frac{\varepsilon/d}{3.7065} - \frac{5.0452 \log A}{\text{Re}} \right) \quad \text{Ecuación 7.39}$$

Donde A :

$$A = \left(\frac{(\varepsilon/d)^{1.1098}}{2.8257} + \frac{5.8506}{\text{Re}^{0.8981}} \right) \quad \text{Ecuación 7.40}$$

- *Método K-2*

Para los accesorios de tubería, válvulas y otras obstrucciones de flujo el método tradicional utiliza una longitud de tubo equivalente L_{equiv} (Ecuación 7.32). El problema con este método es que la longitud especificada está ligada al factor de fricción. Un mejor enfoque consiste en utilizar el método K-2 (Tomado de N. H. Chen, *Industrial Engineering and Chemistry Fundamentals* (1979), 18: 296 en (Crowl, et al., 2002)], el cual utiliza la longitud de la trayectoria del flujo real en la Ecuación 7.32 -donde no se utilizan longitudes equivalentes - y proporciona un enfoque más detallado de las tuberías, teniendo en cuenta entradas y salidas. El método K-2 define el exceso de pérdida de carga en términos de dos constantes, el número de Reynolds y el diámetro interno de la tubería.

$$K_f = \frac{K_1}{\text{Re}} + k_\infty \left(1 + \frac{1}{DI_{pulgadas}} \right) \quad \text{Ecuación 7.41}$$

Donde K_f es el exceso de pérdida de carga (adimensional), y K_1 y K_∞ son constantes (adimensionales), Re es el número de Reynolds (adimensional) y $DI_{pulgadas}$ es el diámetro interno de la trayectoria de flujo (pulgadas).

Tabla 7.4. Constantes del método K-2 para los coeficientes de pérdida en accesorios y válvulas²²

Accesorios	Descripción de accesorio	K₁	K_∞	
Codos				
90°	Estándar (r/D=1), roscado	800	0.40	
	Estándar (r/D=1), flanche/soldado	800	0.25	
	Radio largo (r/D=1.5), todos los tipos	800	0.20	
	Unión (r/D=1.5): 1 soldado (90°)	1000	1.15	
	2 soldados (45°)	800	0.35	
	3 soldados (30°)	800	0.30	
	4 soldados (22.5°)	800	0.27	
	5 soldados (18°)	800	0.25	
	45°	Estándar (r/D=1), todos los tipos	500	0.20
		Radio largo (r/D=1.5)	500	0.15
Unión, 1 soldado (45°)		500	0.25	
Unión, 2 soldados (22.5°)		500	0.15	
180°	Estándar (r/D=1), roscado	1000	0.60	
	Estándar (r/D=1), flanche/soldado	1000	0.35	
	Radio largo (r/D=1.5), todos los tipos	1000	0.30	
Tes				
Usados como codos	Estándar, roscado	500	0.70	
	Radio largo, roscado	800	0.40	
	Estándar, flanche/soldado	800	0.80	
	Bifurcación	1000	1.00	
Ensayo-practica	Roscado	200	0.10	
	Flanche/soldado	150	0.50	
	Bifurcación	100	0.00	
Válvulas				
Puerta, bola o tapón	Tamaño de línea completa, $\beta=1.0$	300	0.10	
	Reducción del ajuste, $\beta=0.9$	500	0.15	
	Reducción del ajuste, $\beta=0.8$	1000	0.25	
Globo	Estándar	1500	4.00	
	Angulo o Tipo Y	1000	2.00	
Diafragma	Tipo presa	1000	2.00	
Mariposa		800	0.25	
Cheque	Impulso	2000	10.0	
	Oscilación	1500	1.50	
	Disco inclinado	1000	0.50	

²² Tomado de William B. Hooper, Chemical Engineering, (Aug. 24,1981), p. 97.

La Tabla 7.4 contiene un listado de valores de K para varios tipos de accesorios y válvulas para ser utilizados en la Ecuación 7.41. Para las entradas y salidas de tubería, la Ecuación 7.41 se modifica con el fin de tener en cuenta la variación en la energía cinética:

$$K_f = \frac{K_1}{Re} + K_\infty \quad \text{Ecuación 7.42}$$

Para entradas normales de tubería se tienen valores de $K_1 = 160$ y $K_\infty = 0.50$, para entradas de tipo Borda $K_\infty = 1.0$. Para el caso de salidas de tubería, $K_1 = 0$ y $K_\infty = 1.0$. Los factores K para los efectos de entrada y salida toman en cuenta los cambios en la energía cinética a través de estos cambios en las tuberías, así que no deben ser considerados otros términos de energía cinética en el balance de energía mecánica. Para números de Reynolds altos ($Re > 10,000$) el primer término de la Ecuación 7.42 es despreciable y $K_f = K_\infty$. Para números de Reynolds bajos ($Re < 50$) el primer término domina por lo que $K_f = K_1/Re$.

Las ecuaciones también están disponibles para orificios²³ y para cambios en el tamaño de la tubería²⁴.

El método K-2 también puede representar descargas de líquidos a través de agujeros. A partir del método K-2 puede ser determinada una expresión para el coeficiente de descarga para una descarga líquida a través de un agujero como se muestra a continuación,

$$C_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum K_f}} \quad \text{Ecuación 7.43}$$

En la Ecuación 7.43, el término $\sum K_f$ es la suma de todos los términos de exceso de pérdida de carga incluyendo, entradas, salidas, longitud de tubería y accesorios, representados por las Ecuaciones 7.32, 7.41 y 7.42

²³ W. B. Hooper, Chemical Engineering, (Aug. 24, 1981), pp. 96-100

²⁴ W. B. Hooper, Chemical Engineering, (Nov. 7, 1988), pp. 89-92.

Para un simple agujero en un tanque sin conexiones de tuberías o accesorios, la fricción es causada solamente por los efectos de entrada y salida del agujero. Para un número de Reynolds mayor a 10000, $K_f = 0.5$ para la entrada y $K_f = 1.0$ para la salida. Así, $\sum K_f = 1.5$, y a partir de la Ecuación 7.43 se tiene que $C_0 = 0.63$, valor que prácticamente coincide con el valor sugerido de 0.61.

El procedimiento de solución para determinar la tasa de flujo másico de material descargado desde un sistema de tuberías es el siguiente:

1. Teniendo en cuenta: la longitud, diámetro y tipo de tubería, la presión y los cambios de elevación en el sistema de tuberías, el trabajo de entrada y salida de las bombas, turbinas y demás sobre el fluido, el número y tipo de accesorios en la tubería, las propiedades del líquido, incluidas la densidad y la viscosidad.
2. Especifique el punto inicial (punto 1) y el punto final (punto 2). Esto debe hacerse con cuidado ya que los términos individuales de la Ecuación 7.30 son altamente dependientes de esta especificación.
3. Determine las presiones y las elevaciones en los puntos 1 y 2. Determine la velocidad inicial del fluido en el punto 1.
4. Suponga un valor para la velocidad en el punto 2. Si el flujo es turbulento completamente desarrollado, no es necesaria esta suposición.
5. Determine el factor de fricción de la tubería utilizando las ecuaciones 7.33 hasta la 7.39.
6. Determine los términos para: el exceso de pérdida de carga en la tubería (use la Ecuación 7.32), los accesorios (use la Ecuación 7.41) y para cualquier efecto de entradas o salidas (use la Ecuación 7.42). Sume los términos de pérdida de carga, y calcule el término de pérdida neta de fricción usando la Ecuación 7.31. Utilice la velocidad en el punto 2.
7. Calcule los valores de todos los términos de la Ecuación 7.30 y sustitúyalos. Si la suma de todos los términos de la Ecuación 7.30 es cero, entonces el cálculo se ha completado. En caso contrario regrese al paso 4 y repita el cálculo.
8. Determine la tasa de flujo másico mediante el uso de la ecuación:

$$\dot{m} = Q_m = \rho \bar{u} A$$

Si el flujo es turbulento completamente desarrollado, entonces la solución es directa. Sustituya los términos conocidos en la Ecuación 7.30, dejando la velocidad en el punto 2 como variable. Resuelva para obtener la velocidad.

7.3.6.2 *Liberación de gas o vapor*

a) **Flujo de vapor a través de agujeros**

Para líquidos en flujo, los cambios en la energía cinética son despreciables frecuentemente, y las propiedades físicas (especialmente la densidad) son constantes. Para gases y vapores en flujo estos supuestos son válidos sólo para pequeños cambios de presión ($P_1/P_2 < 2$) y las velocidades bajas (< 0.3 veces la velocidad del sonido en el gas). La energía contenida en el gas o vapor está presente como resultado de la presión que se convierte en energía cinética a medida que el gas o vapor se escapa y se expande en el punto de fuga.

Las descargas de gas y vapor se clasifican en liberaciones limitadas/reguladas (throttling²⁵) y de libre expansión. Para liberaciones reguladas de gases a través de grietas con grandes pérdidas por fricción; una pequeña parte de la energía inherente a la presión del gas se convierte en energía cinética. Para liberaciones de libre expansión la mayor parte de la energía asociada a la presión del gas se convierte en energía cinética; la suposición de comportamiento isoentrópico²⁶ es generalmente válida.

²⁵ *Throttling process*: Es un proceso irreversible de expansión de un flujo, en el cual un gas se expande a través del paso de un orificio pequeño o una válvula, la expansión del gas presenta pérdidas por fricción que se convierten en energía cinética, traducida en calor. Es un proceso adiabático, donde no hay cambio en la entalpía ni trabajo.

²⁶ La entropía del sistema permanece constante.

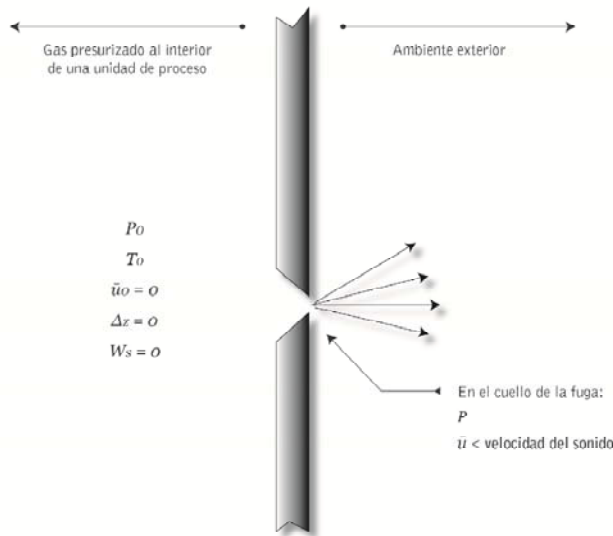


Figura 7.11 Fuga de gas de libre expansión. Las propiedades del gas (P,T) y la velocidad cambian durante el proceso de expansión. Adaptado de (Crowl, et al., 2002 p. 131)

Los modelos fuente para liberaciones reguladas requieren información detallada de la estructura física del punto de fuga, éstos no serán tenidos en cuenta aquí. Los modelos fuente para liberaciones de libre expansión tan sólo requieren el diámetro del punto de fuga.

Una fuga de libre expansión está representada en la Figura 7.11. El balance de energía mecánica de la Ecuación 7.3 describe el flujo para gases y vapores compresibles. Asumiendo cambios de energía potencial despreciables y ausencia de trabajo, se obtiene una forma reducida del balance de energía mecánica para un flujo compresible a través de un agujero:

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left(\frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} \right) + F = 0 \qquad \text{Ecuación 7.44}$$

Un coeficiente de descarga C_1 , es definido de manera similar al coeficiente que fue definido en la sección 7.3.6.1:

$$-\int \frac{dP}{\rho} - F = C_1^2 \left(-\int \frac{dP}{\rho} \right) \quad \text{Ecuación 7.45}$$

La Ecuación 7.45 es combinada con la Ecuación 7.44 e integradas entre dos puntos convenientes. Un primer punto (denotado por el subíndice "0") se selecciona donde la velocidad sea cero y la presión sea P_0 . La integración es llevada a cabo hasta cualquier punto final (arbitrario, denotado sin subíndice), resultando:

$$C_1^2 \int_{P_0}^P \frac{dP}{\rho} + \frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} = 0 \quad \text{Ecuación 7.46}$$

Para cualquier gas ideal bajo una expansión isoentrópica se tiene que,

$$Pv^\gamma = \frac{P}{\rho^\gamma} = \text{constante} \quad \text{Ecuación 7.47}$$

Donde γ es la relación entre capacidades caloríficas, $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$. Substituyendo la Ecuación 7.47 en la Ecuación 7.46, definiendo un nuevo coeficiente de descarga C_0 idéntico a aquel definido para la Ecuación 7.7 e integrando, se obtiene una ecuación que representa la velocidad del fluido en cualquier punto durante la expansión isoentrópica:

$$\bar{u}^2 = 2g_c C_0^2 \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] = \frac{2g_c C_0^2 R_g T_0}{M} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \quad \text{Ecuación 7.48}$$

La segunda forma incorpora la ley de los gases ideales para la densidad inicial ρ_0 . R_g es la constante de los gases ideales y T_0 es la temperatura de la fuente. Usando la ecuación de continuidad (Ecuación 7.49) y la ley de los gases ideales

para una expansión isoentrópica (Ecuación 7.50) se tiene una expresión para la tasa de flujo másico (Ecuación 7.51):

$$\dot{m} = Q_m = \rho \bar{u} A \quad \text{Ecuación 7.49}$$

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/\gamma} \quad \text{Ecuación 7.50}$$

$$Q_m = C_0 A P_0 \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g T_0} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]} \quad \text{Ecuación 7.51}$$

La Ecuación 7.51 describe la tasa de flujo másico en cualquier punto durante una expansión isoentrópica.

Para muchos estudios de seguridad, la tasa máxima de flujo de vapor a través de un agujero es requerida. Esta es obtenida mediante la derivación de la Ecuación 7.51 respecto a $\frac{P}{P_0}$ e igualando la expresión a cero. El resultado se resuelve para la relación de presión y así se obtiene el flujo máximo:

$$\frac{P_{choked}}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad \text{Ecuación 7.52}$$

La presión *choked* P_{choked} es la máxima presión aguas abajo que resulta en un flujo máximo a través del hoyo o tubo. Para presiones aguas abajo que se encuentren por debajo de la presión *choked*, son válidas las siguientes afirmaciones: (1) la velocidad del fluido en el cuello del punto de fuga es la velocidad del sonido en las condiciones predominantes²⁷, y (2) la velocidad y la tasa de flujo másico no pueden ser aumentadas por la reducción de la presión aguas abajo; éstas son independientes de las condiciones aguas abajo. Este tipo de flujo es llamado *choked*, crítico o sónico y está ilustrado en la Figura 7.12.

²⁷ Para un gas, la velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de su temperatura absoluta.

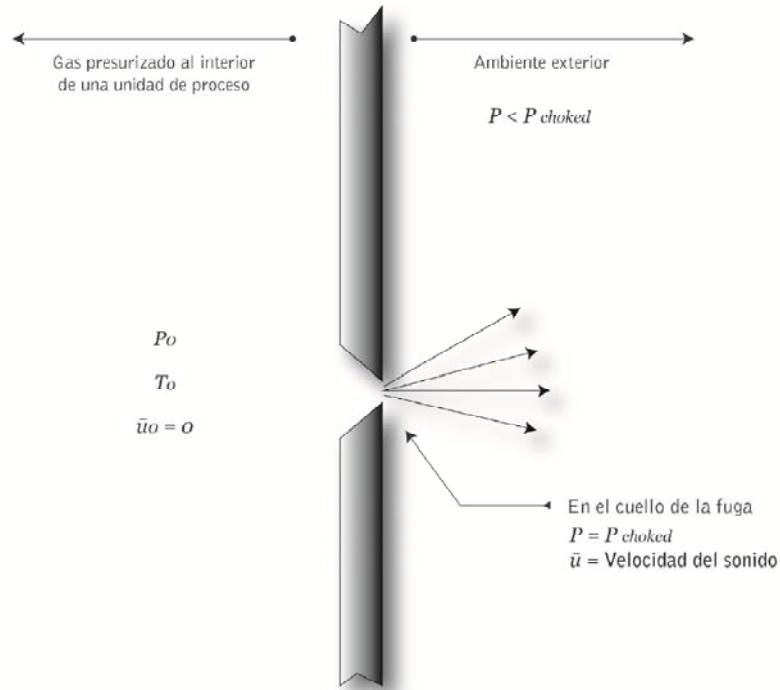


Figura 7.12 Flujo *choked* de gas a través de un agujero. Las propiedades del gas (P,T) y la velocidad cambian durante el proceso de expansión. Adaptado de (Crowl, et al., 2002 p. 133)

Una característica interesante de la Ecuación 7.52 es que para gases ideales, la presión *choked* es una función tan sólo de la relación de capacidad calorífica γ . Por lo tanto:

Tabla 7.5. Valor de la relación γ y el correspondiente valor de la presión de choque de acuerdo al número de moléculas del gas.

Gas	γ	P_{choked}
Monotono / Monoatómico	$\cong 1.67$	$0.487 P_0$
Diatómico y el aire	$\cong 1.40$	$0.528 P_0$
Triatómico	$\cong 1.32$	$0.542 P_0$

Para una fuga de aire hacia condiciones atmosféricas ($P_{choked} = 14.7 \text{ psia}$), si la presión aguas arriba es mayor que $14.7/0.528 = 27.8 \text{ psia}$ o 13.1 psig , el flujo será *choked* y maximizado a través de la fuga. Las condiciones conducentes al flujo *choked* son comunes en los procesos industriales.

El flujo máximo (Ecuación 7.53) se determina mediante la sustitución de la Ecuación 7.52 en la Ecuación 7.51:

$$(Q_m)_{choked} = C_0 A P_0 \sqrt{\frac{g_c M \gamma}{R_g T_0} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad \text{Ecuación 7.53}$$

Donde M es el peso molecular del gas o vapor en el escape, T_0 es la temperatura de la fuente y R_g es la constante de los gases ideales.

Tabla 7.6. Relaciones de capacidad calorífica γ para gases seleccionados. Tomado y adaptado de Crane Co., *Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipes*, Technical Paper 410 (New York: Crane Co., 1986) en (Crowl, et al., 2002 p. 134)

Gas	Fórmula o símbolo químico	Peso molecular aproximado	Relación de capacidad calorífica
Amoniaco	NH_3	17.0	1.32
Cloro	Cl_2	70.9	1.33
Etano	C_2H_6	30.0	1.22
Cloruro de hidrógeno	HCl	36.5	1.41
Sulfuro de hidrógeno	H_2S	34.1	1.30
Metano	CH_4	16.0	1.32
Propano	C_3H_8	44.1	1.15
Propileno ó propeno	C_3H_6	42.1	1.14
Dióxido de azufre	SO_2	64.1	1.26

Para agujeros con bordes afilados y con números de Reynolds mayores que 30000 (y no *choked*) se indica un coeficiente de descarga C_0 de 0.61. Sin embargo, para flujos *choked*, el coeficiente de descarga aumenta conforme la presión aguas abajo desciende²⁸. Para estos flujos y para situaciones donde C_0 es incierto, un valor de 1.0 es recomendado. Valores para la relación de capacidad calorífica γ se encuentran en la Tabla 7.6.

b) Flujo de gases a través de tuberías

El flujo de vapor por tuberías es modelado usando dos casos especiales: comportamiento adiabático y comportamiento isotérmico. El caso adiabático corresponde a flujo de vapor rápido a través de una tubería aislada. El caso isotérmico por su parte corresponde a un flujo a través de una tubería aislada que se mantiene a temperatura constante. Los flujos reales de vapor se comportan entre los casos adiabático e isotérmico. Desafortunadamente, el caso real es difícil de modelar y no existen ecuaciones útiles y generalizadas para este caso.

Para ambos casos, isotérmico y adiabático, es conveniente definir un número Mach (Ma) como la relación de la velocidad del gas y la velocidad del sonido en el gas en las condiciones predominantes:

$$Ma = \frac{\bar{u}}{a} \quad \text{Ecuación 7.54}$$

Donde a es la velocidad del sonido. La velocidad del sonido es calculada usando una relación termodinámica

$$a = \sqrt{g_c \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s} \quad \text{Ecuación 7.55}$$

La Ecuación 7.55 es equivalente a la Ecuación 7.56 en el caso de estar trabajando con un gas ideal:

²⁸ Robert H. Perry and Cecil H. Chilton, Chemical Engineers Handbook, 7th ed. (New York: McGraw-Hill, 1997), pp. 10-16.

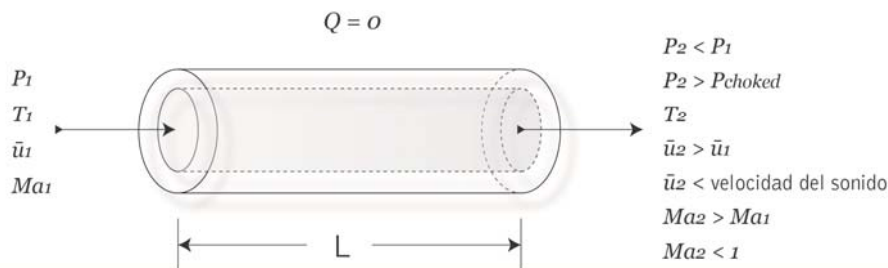
$$a = \sqrt{\frac{g_c \gamma R_g T}{M}}$$

Ecuación 7.56

La Ecuación 7.56 muestra que para gases ideales la velocidad del sonido es una función de la temperatura únicamente. Para aire a 20°C la velocidad del sonido es de 344 m/s (1129 pies/s).

- *Flujos adiabáticos*

Un tubo adiabático que contiene una corriente de vapor se muestra en la Figura 7.13. Para este caso particular, la velocidad de salida es menor que la velocidad del sonido. El flujo es impulsado por un gradiente de presión a lo largo de la tubería. Conforme el gas fluye a través de la tubería, se expande debido a una disminución en la presión. Esta expansión conduce a un incremento en la velocidad y en la energía cinética del gas. La energía cinética se obtiene de la energía térmica del gas; que se traduce en una disminución de la temperatura. Sin embargo, están presentes fuerzas de fricción entre el gas y la pared de la tubería. Estas fuerzas de fricción aumentan la temperatura del gas. Dependiendo de la magnitud de los términos de la energía cinética y de las fuerzas de fricción, un aumento o disminución de la temperatura del gas es posible.



Para los alrededores, $P = P_2 > P_{choked}$

Figura 7.13 Flujo adiabático (no choked) de gas a través de una tubería. Adaptado de (Crowl, et al., 2002 p. 137)

El balance de energía mecánica (Ecuación 7.3) también aplica a flujos adiabáticos, que para este caso particular es más conveniente expresarla así:

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{\bar{u}d\bar{u}}{\alpha g_c} + \frac{g}{g_c} dz + dF = -\frac{\delta W_s}{\dot{m}} \quad \text{Ecuación 7.57}$$

Para este caso es válido asumir lo siguiente: $\frac{g}{g_c} dz \approx 0$ es válido para gases.

Asumiendo un tubo recto sin válvulas o accesorios, la Ecuación 7.31 y la Ecuación

7.32 pueden ser combinados y derivados para resultar en $dF = \frac{2f\bar{u}^2 dL}{g_c d}$. Dado que no hay presentes conexiones mecánicas, $\delta W_s = 0$.

Una parte importante para el término de pérdidas por fricción es la suposición de un factor de fricción de Fanning f constante a lo largo de la tubería. Esta suposición es válida únicamente cuando se tiene un número de Reynolds elevado.

Un balance total de energía es útil con el fin de describir los cambios de temperatura en el gas. Para este proceso de flujo continuo el balance de energía está dado por:

$$dh + \frac{\bar{u}d\bar{u}}{\alpha g_c} + \frac{g}{g_c} dz = \delta q - \frac{\delta W_s}{\dot{m}} \quad \text{Ecuación 7.58}$$

Donde h es la entalpía del gas y q es el calor. Las siguientes suposiciones se acogen:

$dh = C_p dT$ para un gas ideal,

$g/g_c dz \approx 0$ es válido para gases,

$\delta q = 0$ dado que la tubería es adiabática,

$\delta W_s = 0$ ya que no existen conexiones mecánicas en el sistema.

Las suposiciones son aplicadas entonces a la Ecuación 7.58 y la Ecuación 7.57. Estas ecuaciones se combinan, integran (entre el punto inicial "0" y un punto final arbitrario), y manipulan para dar paso a lo siguiente²⁹:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Y_1}{Y_2} \quad \text{donde} \quad Y_i = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma_i^2 \quad \text{Ecuación 7.59}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{Ma_1}{Ma_2} \sqrt{\frac{Y_1}{Y_2}} \quad \text{Ecuación 7.60}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{Ma_1}{Ma_2} \sqrt{\frac{Y_2}{Y_1}} \quad \text{Ecuación 7.61}$$

$$G = \rho \bar{u} = Ma_1 P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_1}} = Ma_2 P_2 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_2}} \quad \text{Ecuación 7.62}$$

Donde G es el flujo másico con unidades de masa/(área tiempo).

$$\frac{\gamma + 1}{2} \ln \left(\frac{Ma_2^2 Y_1}{Ma_1^2 Y_2} \right) - \left(\frac{1}{Ma_1^2} - \frac{1}{Ma_2^2} \right) + \gamma \left(\frac{4fL}{d} \right) = 0 \quad \text{Ecuación 7.63}$$

Energía cinética
Compresibilidad
Fricción del tubo

La Ecuación 7.63 relaciona los números Mach a las pérdidas por fricción en la tubería. Varias contribuciones energéticas pueden ser identificadas. La compresibilidad cuenta para el cambio en la velocidad resultante de la expansión del gas.

²⁹ Octave Levenspiel, Engineering Flow and Heat Exchange (New York: Plenum Press, 1986), p. 43. en (Crowl, et al., 2002 p. 138)

La Ecuación 7.63 y la Ecuación 7.62 son transformadas a una nueva forma, más útil y conveniente para la finalidad, reemplazando el número Mach por las presiones y temperaturas asociadas por medio del uso de la Ecuación 7.59 a la Ecuación 7.61:

$$\frac{\gamma + 1}{\gamma} \ln \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1} - \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \left(\frac{P_1^2 T_2^2 - P_2^2 T_1^2}{T_2 - T_1} \right) \left(\frac{1}{P_1^2 T_2} - \frac{1}{P_2^2 T_1} \right) + \left(\frac{4fL}{d} \right) = 0 \quad \text{Ecuación 7.64}$$

$$G = \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{T_2 - T_1}{(T_1/P_1)^2 - (T_2/P_2)^2}} \quad \text{Ecuación 7.65}$$

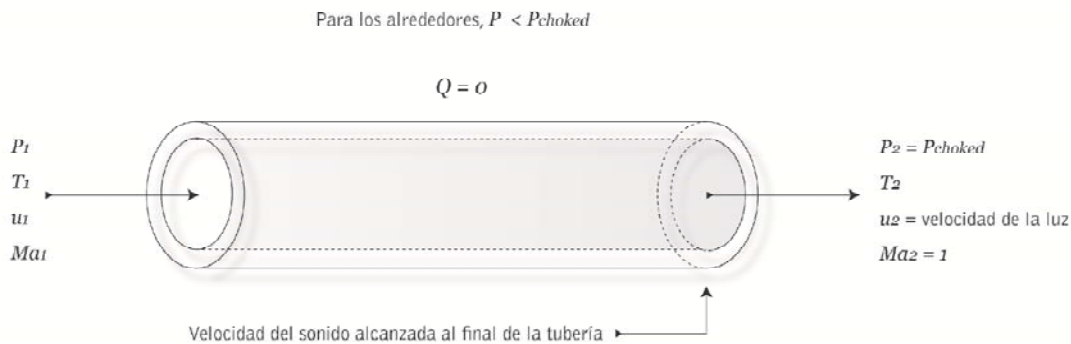


Figura 7.14 Flujo adiabático (*choked*) de gas a través de una tubería. Adaptado de (Crowl, et al., 2002 p. 139)

Para la mayoría de los casos se conocen datos como el largo de la tubería (L), el diámetro interno (d), la temperatura aguas arriba (T_1) y la presión (P_1) y la presión aguas abajo (P_2). Para calcular el flujo másico G , el procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Determinar la rugosidad de la tubería ε a partir de la Tabla 7.3 calcular ε/d .
2. Determinar el factor de fricción de Fanning f a partir de la Ecuación 7.36. Esta asume flujo turbulento completamente desarrollado con números de Reynolds altos. Esta suposición puede ser corroborada después, pero normalmente es válido.
3. Determinar T_2 a partir de la Ecuación 7.64.
4. Calcular el flujo másico total G_a a partir de la Ecuación 7.65.

Para tuberías largas o para tuberías con amplias diferencias de presión a lo largo de sí mismas, la velocidad del gas puede ser aproximada a la velocidad del sonido. Un caso como este se muestra en la Figura 7.14. Cuando la velocidad del sonido es alcanzada, el flujo del gas es llamado *choked*. El gas alcanza la velocidad del sonido al final del tubo. Si la presión aguas arriba aumenta o si la presión aguas abajo disminuye, la velocidad del gas al final de tubo permanece constante a la velocidad del sonido. Si la presión aguas abajo disminuye por debajo de la presión *choked* P_{choked} , el flujo a través de la tubería permanece *choked* y constante, independientemente del valor de la presión aguas abajo. La presión al final de la tubería permanecerá como la P_{choked} aún cuando esta presión sea mayor a la presión ambiente. Para las ecuaciones 7.59 a 7.63 de flujo *choked* es posible hacer una simplificación estableciendo $Ma_2 = 1.0$. Los resultados son:

$$\frac{T_{choked}}{T_1} = \frac{2Y_1}{\gamma + 1} \quad \text{Ecuación 7.66}$$

$$\frac{P_{choked}}{P_1} = \frac{Ma_1}{\sqrt{\gamma + 1}} \sqrt{\frac{2Y_1}{\gamma + 1}} \quad \text{Ecuación 7.67}$$

$$\frac{\rho_{choked}}{\rho_1} = \frac{Ma_1}{\sqrt{\frac{\gamma + 1}{2Y_1}}} \quad \text{Ecuación 7.68}$$

$$G_{choked} = \rho \bar{u} = Ma_1 P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_1}} = P_{choked} \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_{choked}}} \quad \text{Ecuación 7.69}$$

$$\frac{\gamma + 1}{2} \ln \left(\frac{2Y_1}{Ma_1^2 (\gamma + 1)} \right) - \left(\frac{1}{Ma_1^2} - 1 \right) + \gamma \left(\frac{4fL}{d} \right) = 0 \quad \text{Ecuación 7.70}$$

El flujo *choked* ocurre si la presión aguas abajo es menor a la P_{choked} . Este hecho puede ser verificado mediante el uso de la Ecuación 7.67.

Para la mayoría de los casos asociados a flujos adiabáticos *choked* los valores de longitud (L), diámetro interno (d), presión aguas arriba (P_1) y temperatura (T_1) son conocidos. Para calcular el flujo másico G se usa el siguiente procedimiento:

1. Determine el factor de fricción de Fanning f mediante el uso de la Ecuación 7.36. Esta asume flujo turbulento completamente desarrollado con números de Reynolds altos. Este supuesto puede ser corroborado y se considera normalmente válido.
2. Determine Ma_1 a partir de la Ecuación 7.70.
3. Determine el flujo másico G_{choked} a partir de la Ecuación 7.69.
4. Determine P_{choked} a partir de la Ecuación 7.67 para confirmar que la operación sucede a condiciones características de flujo *choked*.

Las ecuaciones 5.62 a 5.66 para flujo adiabático pueden ser modificadas usando el método 2-K, mencionado en la sección 7.3.6.17.3.6.1c), y teniendo en cuenta que se debe sustituir el término $\sum K_f$ por $\frac{4fL}{d}$.

El procedimiento puede ser simplificado definiendo un factor de expansión del gas Y_g . Para una corriente de gas, el flujo másico, para condiciones sónicas (a la velocidad del sonido) y no sónicas puede ser calculado mediante la fórmula de Darcy³⁰

$$G = \frac{\dot{m}}{A} = Y_g \sqrt{\frac{2g_c \rho_1 (P_1 - P_2)_1}{\sum K_f}} \quad \text{Ecuación 7.71}$$

Donde: G es el flujo másico (masa/área-tiempo), \dot{m} es la tasa de flujo másico, A es el área de la descarga (fuga) (longitud²), Y_g es el factor de expansión del gas (adimensional), g_c es la constante gravitacional (fuerza/masa-aceleración), ρ_1 es la densidad del gas aguas arriba (masa/volumen), P_1 es la presión del gas aguas arriba (fuerza/área), P_2 es la presión del gas aguas abajo (fuerza/área), y $\sum K_f$ es

³⁰ Crane Co., Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipes, Technical Report 410 (New York, Crane Co., 1986).

El término de exceso de pérdida de cabeza de carga, incluyendo entradas y salidas, longitud de la tubería y accesorios (adimensional).

Los términos de pérdida de cabeza de presión $\sum K_f$ se calculan mediante el uso del método 2-K mencionado anteriormente (Sección 7.3.6.17.3.6.1c)). Para la mayoría de las descargas accidentales de gases el flujo es considerado turbulento completamente desarrollado. Esto significa que para tuberías, el factor de fricción es independiente del número de Reynolds y para accesorios $K_f = K_\infty$ y la solución es directa.

El factor de expansión del gas Y_g en la Ecuación 7.71 depende únicamente de la relación entre la capacidad calorífica del gas γ y los elementos que generan fricción a lo largo de la trayectoria de flujo $\sum K_f$. Una ecuación para el factor de expansión del gas para flujo *choked* se obtiene igualando la Ecuación 7.71 y la Ecuación 7.69 y resolviendo el sistema de ecuaciones para Y_g . El resultado es el siguiente:

$$Y_g = Ma_1 \sqrt{\frac{\gamma \sum K_f}{2} \left(\frac{P_1}{P_1 - P_2} \right)} \quad \text{Ecuación 7.72}$$

En la Ecuación 7.72, Ma_1 es el número Mach aguas arriba.

El procedimiento para determinar el factor de expansión del gas se muestra a continuación:

- Paso 1** Se determina el número Mach aguas arriba Ma_1 mediante el uso de la Ecuación 7.70. Se debe sustituir el término $\sum K_f$ por $4fL/d$ con el fin de incluir efectos de tubería y accesorios. La solución se obtiene mediante un proceso de ensayo y error, suponiendo valores del número mach aguas arriba y determinando si el número propuesto cumple con los objetivos de la ecuación. Este proceso puede ser llevado a cabo con la ayuda de una hoja de cálculo.

Paso 2 Este paso se realiza para determinar la relación de presión sónica a partir de la Ecuación 7.67. Si la relación actual es mayor que la relación obtenida con la Ecuación 7.67, entonces, el flujo es sónico o *choked* y la caída de presión predicha por la Ecuación 7.67 es usada para continuar con los cálculos. Si la relación actual es menor que aquella obtenida con la Ecuación 7.67, entonces el flujo no es sónico y se utiliza la relación actual de caída de presión.

Paso 3 El factor de expansión del gas γ_g se calcula a partir de la Ecuación 7.72. El cálculo para determinar el factor de expansión puede ser realizado si se cuenta con los valores de γ y de $\sum K_f$. Este cálculo puede hacerse con ayuda de la Figura 7.15 y Figura 7.16.

Como se muestra en la Figura 7.15, la relación de presión $(P_1 - P_2)/P_1$ es una función débil de la relación con la capacidad calorífica. El factor de expansión Y_g tiene una pequeña dependencia de γ , con Y_g variando menos del 1% del valor de $\gamma = 1.4$ en el rango de $\gamma = 1.2$ a $\gamma = 1.67$. La Figura 7.16 muestra el factor de expansión para $\gamma = 1.4$.

Los resultados de la Figura 7.15 y la Figura 7.16 pueden ajustarse mediante una ecuación de la forma $\ln Y_g = A(\ln K_f)^3 + B(\ln K_f)^2 + C(\ln K_f) + D$, donde A , B y C son constantes. Los resultados se muestran en la Tabla 7.7 y son válidos para los rangos indicados para K_f , dentro del 1%. El procedimiento para determinar la tasa de flujo másico adiabático a través de una tubería u hoyo es el siguiente:

1. Conociendo: γ basado en el tipo de gas; el diámetro, longitud y tipo de tubería; entradas y salidas en la tubería, el número y tipo de accesorios; la caída total de presión; densidad del gas aguas arriba.
2. Se asume flujo turbulento completamente desarrollado para determinar el factor de fricción de la tubería y los términos para calcular el exceso de caída de presión debido a accesorios, entradas y salidas en la tubería. El número de Reynolds puede ser estimado al final de los cálculos para comprobar la suposición mencionada anteriormente. Se suman los términos para de caída de presión para obtener $\sum K_f$.

3. Se calcula $(P_1 - P_2)/P_1$ a partir de la caída de presión especificada. Compare este valor con la Figura 7.15 para determinar si el flujo es sónico. Todas las áreas por encima de las curvas representadas en la Figura 7.15 representan flujo sónico. Determine la presión sónica P_2 usando la Figura 7.15 directamente, interpolando un valor de la tabla, o usando los valores de la Tabla 7.7.
4. Determine el factor de expansión a partir de la Figura 7.16. Si el valor está por fuera de la figura, interpólole a partir de la tabla o use la ecuación mostrada con la Tabla 7.7.
5. Calcule la tasa de flujo másico usando la Ecuación 7.71. En este paso use la presión sónica calculada en la paso 3.

Tabla 7.7. Correlaciones³¹ para el factor de expansión Y_g , y la relación de la caída de presión $(P_1 - P_2)/P_1$, como una función del exceso de pérdida de carga K_f^2 .

Función	A	B	C	D	Rango de K_f
Factor de expansión Y_g	0.0006	-0.0185	0.1141	0.5304	0.1-100
Relación de caída de presión $\gamma = 1.2$	0.0009	-0.0308	0.261	-0.7248	0.1-100
Relación de caída de presión $\gamma = 1.4$	0.0011	-0.0302	0.238	-0.6455	0.1-300
Relación de caída de presión $\gamma = 1.67$	0.0013	-0.0287	0.213	-0.5633	0.1-300

Este método es aplicable a descargas de gas a través de tuberías y hoyos.

³¹ Las correlaciones están dentro del 1% del valor real en el intervalo especificado. La ecuación utilizada para hallar el factor de expansión y la relación de caída de presión es de la forma: $\ln Y_g = A(\ln K_f)^3 + B(\ln K_f)^2 + C(\ln K_f) + D$

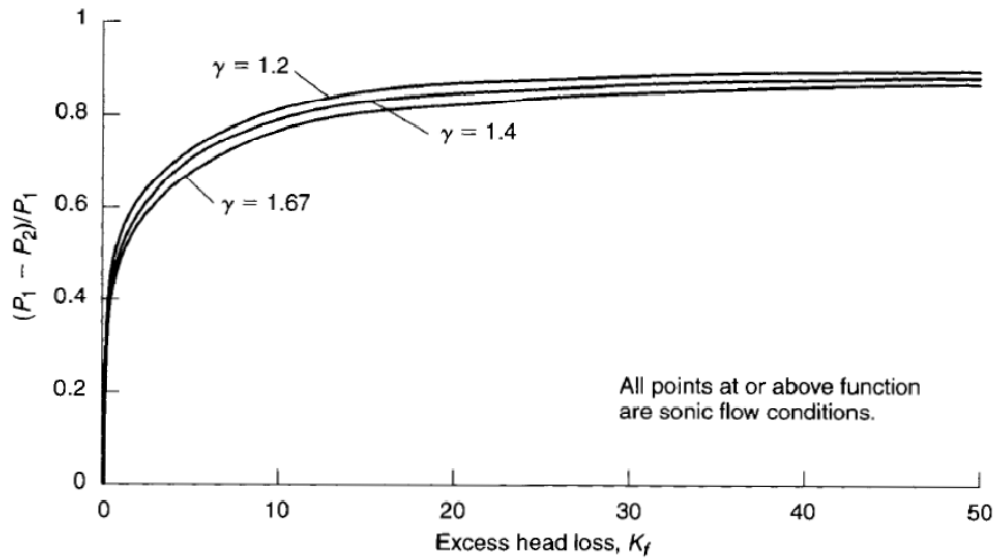


Figura 7.15 Caída de la presión sónica para flujo adiabático a través de una tubería para diferentes relaciones de capacidad calorífica. Tomado de AICHE/CCPS, Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases (New York: American Institute of Chemical Engineers, 1999) en (Crowl, et al., 2002 p. 142)

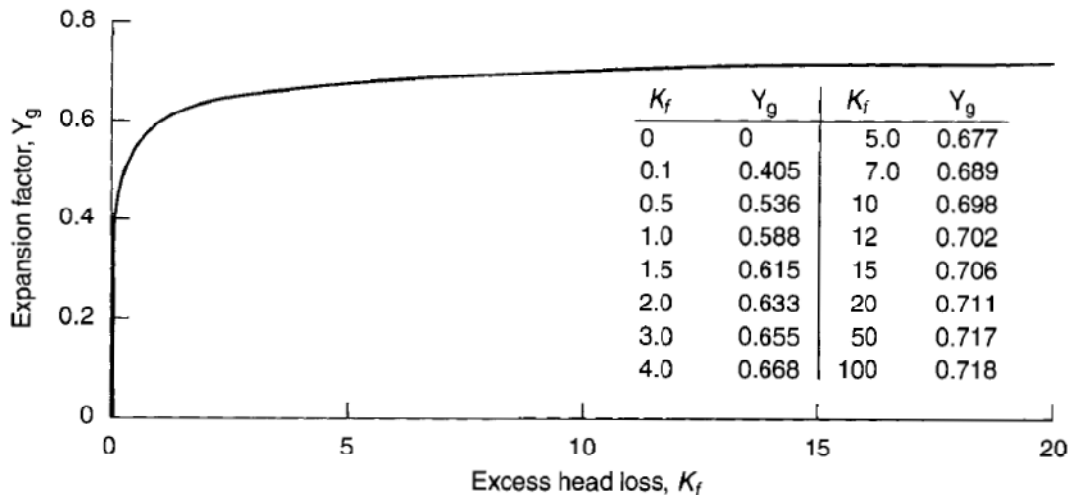


Figura 7.16 Factor de expansión Y_g para flujo adiabático a través de tuberías para $\gamma = 1.4$. Tomado de AICHE/CCPS, Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases (New York: American Institute of Chemical Engineers, 1999). en (Crowl, et al., 2002 p. 142)

- *Flujos isotérmicos*

El flujo isotérmico de un gas a través de una tubería con fricción se muestra en la Figura 7.17. Para este caso la velocidad del gas se asume muy inferior a la velocidad sónica de esta sustancia. Un gradiente de presión a lo largo de la tubería proporciona la fuerza que impulsa el transporte del gas.

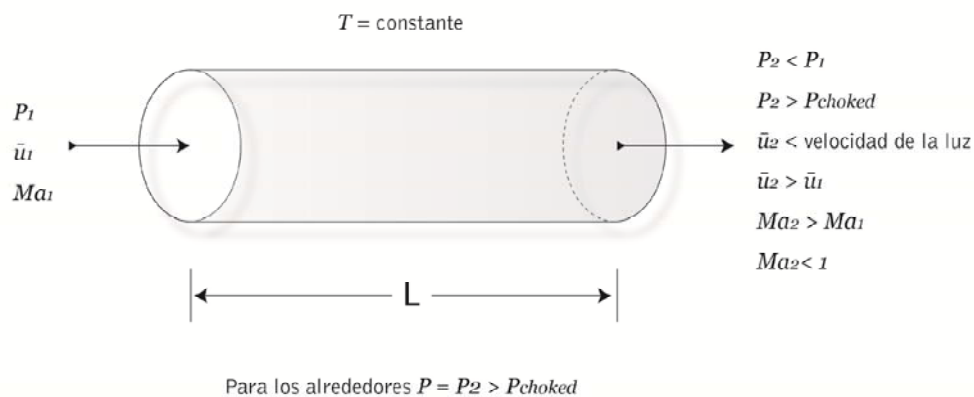


Figura 7.17 Flujo isotérmico (no *choked*) de gas a través de una tubería. Adaptado (Crowl, et al., 2002 p. 143)

Conforme el gas se expande a través del gradiente de presión, la velocidad aumenta con el fin de mantener la misma tasa de flujo másico. La presión al final (extremos) de la tubería es igual a la presión de los alrededores. La temperatura es constante a lo largo de la tubería.

El flujo isotérmico se representa por el balance de energía mecánica mostrado en la Ecuación 7.57. Los siguientes supuestos son válidos para este caso:

$$\frac{g}{g_c} dz \approx 0$$

La expresión $\frac{g}{g_c}$ es válida para gases, y, si se combina con la Ecuación 7.31 y la Ecuación 7.32 para ser derivada se obtiene que

$$dF = \frac{2f\bar{u}^2 dL}{g_c d} \quad \text{Ecuación 7.73}$$

Asumiendo f constante, y $\delta W_s = 0$ debido a que no existen conexiones mecánicas. Un balance de energía total no es necesario porque la temperatura se mantiene constante.

Aplicando los supuestos a la Ecuación 7.57 y manipulándolos considerablemente, se obtiene³²

$$T_2 = T_1 \quad \text{Ecuación 7.74}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{Ma_1}{Ma_2} \quad \text{Ecuación 7.75}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{Ma_1}{Ma_2} \quad \text{Ecuación 7.76}$$

$$G = \rho \bar{u} = Ma_1 P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T}} \quad \text{Ecuación 7.77}$$

Donde G es el flujo másico con unidades de masa/(área tiempo), y

$$2 \ln \frac{Ma_2}{Ma_1} - \frac{1}{\gamma} \left(\frac{1}{Ma_1^2} - \frac{1}{Ma_2^2} \right) + \frac{4fL}{d} = 0 \quad \text{Ecuación 7.78}$$

Energía
cinética

Compresibilidad

Fricción
del tubo

Una forma diferente de escribir la Ecuación 7.78 es reemplazar los números Mach por términos de presión. Esto se logra usando de la Ecuación 7.74 a la Ecuación 7.76 y teniendo como resultado la Ecuación 7.79.

³² Levenspiel, *Engineering Flow*, p. 46.

$$2 \ln \frac{P_1}{P_2} - \frac{g_c M}{G^2 R_g T} (P_1^2 - P_2^2) + \frac{4fL}{d} = 0$$

Ecuación 7.79

Energía
cinética

Compresibilidad

Fricción
del tubo

Un problema típico de este tema consiste en determinar el flujo másico que circula a través de una tubería de longitud (L), diámetro interno (d) y presión aguas arriba y aguas abajo (P_1 y P_2). El procedimiento para su solución es el siguiente:

1. Determine el factor de fricción de Fanning f usando la Ecuación 7.36. Se supone flujo turbulento completamente desarrollado con números de Reynolds altos. Esta suposición puede ser probada posteriormente y se considera válida generalmente.
2. Calcule el flujo másico G a partir de la Ecuación 7.79.

Levenspiel³³ mostró que la máxima velocidad posible durante un flujo isotérmico de un gas en una tubería no es la velocidad del sonido, como si sucede en el caso adiabático. En términos de los números Mach la velocidad máxima es:

$$Ma_{choked} = \frac{1}{\sqrt{\gamma}}$$

Ecuación 7.80

Este resultado se muestra a partir del balance de energía mecánica y reordenando en la siguiente forma:

$$-\frac{dP}{dL} = \frac{2fG^2}{g_c \rho d} \left[\frac{1}{1 - (\bar{u}^2 \rho / g_c P)} \right] = \frac{2fG^2}{g_c \rho d} \left(\frac{1}{1 - \gamma Ma^2} \right)$$

Ecuación 7.81

La cantidad $-(dP/dL) \rightarrow \infty$ cuando $Ma \rightarrow 1/\sqrt{\gamma}$. Así, para el flujo isotérmico *choked* en una tubería (mostrado en la Figura 7.18) aplican las siguientes ecuaciones:

³³ Levenspiel, *Engineering Flow*, p. 46.

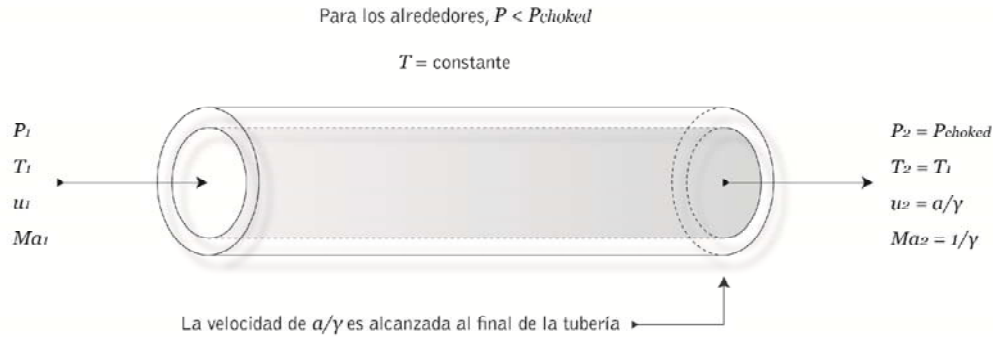


Figura 7.18 Flujo isotérmico *choked* de gas a través de una tubería. La máxima velocidad es alcanzada en el extremo final del tubo. (Crowl, et al., 2002 p. 146)

$$T_{choked} = T_1$$

Ecuación 7.82

$$\frac{P_{choked}}{P_1} = Ma_1 \sqrt{\gamma}$$

Ecuación 7.83

$$\frac{\rho_{choked}}{\rho_1} = Ma_1 \sqrt{\gamma}$$

Ecuación 7.84

$$\frac{\bar{u}_{choked}}{u_1} = \frac{1}{Ma_1 \sqrt{\gamma}}$$

Ecuación 7.85

$$G_{choked} = \rho \bar{u} = \rho_1 \bar{u}_1 = Ma_1 P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T}} = P_{choked} \sqrt{\frac{g_c M}{R_g T}}$$

Ecuación 7.86

Donde G_{choked} es el flujo másico con unidades de masa/(área tiempo).

$$\ln\left(\frac{1}{\gamma Ma_1^2}\right) - \left(\frac{1}{\gamma Ma_1^2} - 1\right) + \frac{4fL}{d} = 0$$

Ecuación 7.87

Para la mayoría de problemas típicos los parámetros conocidos son: la longitud de la tubería (L), el diámetro interno (d), la presión aguas arriba (P_1) y la temperatura (T). A partir de estos parámetros, el flujo másico G se calcula con el siguiente procedimiento:

1. Determine el factor de fricción de Fanning f usando la Ecuación 7.36. Se supone flujo turbulento completamente desarrollado con números de Reynolds altos. Esta suposición puede ser probada posteriormente y se considera generalmente válida.
2. Calcule Ma_1 a partir de la Ecuación 7.87.
3. Calcule el flujo másico G a partir de la Ecuación 7.86.

Para liberaciones de gas a través de tuberías es importante conocer si esta se da en condiciones adiabáticas o isotérmicas. Para cualquiera de los dos casos, la velocidad del gas aumenta debido a la expansión del gas asociada a la disminución de la presión. En el caso de flujos adiabáticos, la temperatura del gas tiene la opción de aumentar o disminuir, dependiendo de la magnitud de los términos de energía cinética y fricción. Para flujos *choked*, la presión³⁴ adiabática es menor si se compara con la presión isotérmica. Para casos reales de flujo a través de tuberías, el flujo obtenido a partir de cálculos adiabáticos tiende a ser mayor que el real y, en el caso de cálculos isotérmicos tiende a ser menor. Finalmente, bajo condiciones de flujo *choked* sónico es difícil de alcanzar condiciones isotérmicas dado que la velocidad de flujo del gas es muy alta. Como consecuencia, el modelo de flujo adiabático debe ser elegido para fugas de gases compresibles que fluyen a través de tuberías.

Se ha establecido que para los escenarios en los que se tiene el flujo de gases o vapores es posible representarlos mediante descargas por agujeros u orificios; esta aproximación resulta en valores superiores a los valores obtenidos por el método adiabático, asegurando cálculos de diseño seguros. El cálculo mediante descargas por orificios es más fácil de aplicar dado que se requiere tan solo el diámetro de la tubería, la presión y temperatura aguas arriba, además, no es necesaria una configuración detallada de la tubería como en el caso de los

³⁴ Presión *choked*

métodos adiabático e isotérmico. Debe tenerse en cuenta que las presiones *choked* calculadas difieren en cada caso, con una diferencia sustancial entre el método del agujero y los casos adiabático e isotérmico. Además, en el caso del método del orificio una presión *choked* puede no ser de este tipo debido a las altas presiones aguas abajo. Así, el método de tubo adiabático debería ser el método de elección, asociado a sus resultados aproximados a la realidad y a su sobredimensionamiento leve, útil en el caso de seguridad en el diseño.

7.3.6.3 Flujo de dos fases

a) Líquidos flash

Los líquidos almacenados bajo presión, a temperaturas por debajo de su punto normal de ebullición, presentan problemas considerables por acción de evaporación parcial o flash. Si un tanque, tubo, o cualquier dispositivo de contención sufre una fuga, el líquido presentará una evaporación *flash*, y, algunas veces de forma explosiva.

El proceso flashing ocurre a altas velocidades por lo que el proceso puede considerarse adiabático. El exceso de energía contenida en el líquido sobrecalentado hace que dicho líquido se vaporice y baje la temperatura hasta el punto de ebullición. Si m es la masa del líquido original, C_p es la capacidad calorífica (energía/masa temperatura), T_0 la temperatura del líquido antes de la despresurización y T_b el punto de ebullición del líquido despresurizado, entonces la energía excedente contenida en el líquido sobrecalentado está dado por la Ecuación 7.88.

$$Q = mC_p(T_0 - T_b) \quad \text{Ecuación 7.88}$$

Esta energía convierte en vapor el líquido. Si ΔH_v es el calor (o entalpía) de vaporización del líquido, la masa del líquido vaporizado m_v está dada por la Ecuación 7.89.

$$m_v = \frac{Q}{\Delta H_v} = \frac{mC_p(T_0 - T_b)}{\Delta H_v} \quad \text{Ecuación 7.89}$$

La fracción del líquido vaporizado es:

$$f_v = \frac{m_v}{m} = \frac{C_p(T_0 - T_b)}{\Delta H_v} \quad \text{Ecuación 7.90}$$

La Ecuación 7.90 asume constantes las propiedades físicas en el rango de temperatura de T_0 a T_b . Una expresión más general, evitando la suposición anterior, se calcula teniendo en cuenta el cambio en la masa m del líquido por efectos del cambio en la temperatura T :

$$dm = \frac{mC_p}{\Delta H_v} dT \quad \text{Ecuación 7.91}$$

Si la Ecuación 7.91 se integra en el intervalo comprendido entre T_0 (con masa m) y T_b (con masa $m - m_v$):

$$\int_m^{m-m_v} \frac{dm}{m} = \int_{T_0}^{T_b} \frac{C_p}{\Delta H_v} dT \quad \text{Ecuación 7.92}$$

$$\ln\left(\frac{m - m_v}{m}\right) = -\frac{\bar{C}_p(T_0 - T_b)}{\Delta \bar{H}_v} \quad \text{Ecuación 7.93}$$

$\Delta \bar{H}_v$ y \bar{C}_p son el calor latente de vaporización promedio y la capacidad calorífica promedio, respectivamente, en el rango comprendido entre T_0 y T_b . Resolviendo para la fracción del líquido vaporizado, $f_v = m_v/m$, se obtiene:

$$f_v = 1 - e^{[-\bar{C}_p(T_0 - T_b)/\Delta H_v]} \quad \text{Ecuación 7.94}$$

En el caso de *Flashing liquids* que se escapan a través de un agujero o una tubería debe tenerse especial cuidado (Fauske, 1985). Si la longitud de la

trayectoria de liberación de un fluido es corta, no existen condiciones de equilibrio, y el líquido no tiene tiempo de sufrir una evaporación flash dentro del punto de fuga; el fluido sufrirá una evaporación flash en la parte externa del dispositivo de almacenamiento (contención). En este caso, son aplicables las ecuaciones de la sección 7.3.6.1a).

Si la longitud de la trayectoria de liberación de un fluido es mayor a 10 cm, se logran condiciones de equilibrio *flash* y el flujo es *choked*. Una buena aproximación consiste en asumir una presión *choked* igual a la presión de vapor del líquido. El resultado será válido únicamente para los líquidos almacenados a presiones mayores que la presión de vapor. De esta forma del flujo másico está dado por la Ecuación 7.95, donde A es el área de la fuga, C_0 es el coeficiente de descarga, ρ_f es la densidad del líquido, P es la presión dentro del dispositivo de contención y P^{sat} es la presión de vapor del *flashing liquid* a temperatura ambiente.

$$Q_m = AC_0 \sqrt{2\rho_f g_c (P - P^{sat})}$$

Ecuación 7.95

Para líquidos almacenados a una presión igual a la presión de vapor, $P = P^{sat}$, la Ecuación 7.95 no tiene validez. En este caso se requiere una aproximación más detallada. Si se considera un líquido que está en reposo y es acelerado a través de un punto de fuga es posible asumir que su energía cinética es dominante y los efectos de la energía potencial son despreciables.

A partir de un balance de energía mecánica (Ecuación 7.3), y teniendo en cuenta que el volumen específico³⁵ $v = 1/\rho$ es posible decir que:

$$-\int_1^2 v dP = \frac{\bar{u}_2^2}{2g_c}$$

Ecuación 7.96

Un flujo másico G con unidades de masa/(área tiempo) está definido por

³⁵ Con unidades de volumen/masa

$$G = \rho \bar{u} = \frac{\bar{u}}{v}$$

Ecuación 7.97

Combinando la Ecuación 7.97 con la Ecuación 7.96 y considerando que la velocidad másica es constante, tenemos que:

$$-\int_1^2 v dP = \frac{\bar{u}_2^2}{2g_c} = \frac{G^2 v_2^2}{2g_c}$$

Ecuación 7.98

Si resolvemos la Ecuación 7.98 para G y asumimos que el punto 2 puede ser definido como cualquier punto a lo largo de la trayectoria de flujo se obtiene que:

$$G = \frac{\sqrt{-2g_c \int v dP}}{v}$$

Ecuación 7.99

La Ecuación 7.99 contiene el máximo punto al cual el flujo *choked* ocurre. Bajo estas condiciones, $dG/dP = 0$. Derivando la Ecuación 7.99 e igualando la ecuación a cero, tenemos:

$$\frac{dG}{dP} = 0 = -\frac{(dv/dP)}{v^2} \sqrt{-2g_c \int v dP} - \frac{g_c}{\sqrt{-2g_c \int v dP}}$$

Ecuación 7.100

$$0 = -\frac{G(dv/dP)}{v} - \frac{g_c}{vG}$$

Ecuación 7.101

Resolviendo la Ecuación 7.101 para G se obtiene:

$$G = \frac{Q_m}{A} = \sqrt{-\frac{g_c}{(dv/dP)}}$$

Ecuación 7.102

El volumen específico de dos fases está dado por:

$$v = v_{fg} f_v + v_f$$

Ecuación 7.103

Donde v_{fg} es la diferencia en volumen específico entre el vapor y el líquido, v_f es volumen específico del líquido y f_v es la fracción másica del vapor. Derivando la Ecuación 7.103 respecto a la presión se tiene que lo siguiente:

$$\frac{dv}{dP} = v_{fg} \frac{df_v}{dP}$$

Ecuación 7.104

A partir de la Ecuación 7.90 conocemos f_v y obtenemos la Ecuación 7.105. A partir de la ecuación de Clausius-Clapyron, en condición de saturación se tiene que:

$$df_v = -\frac{C_p}{\Delta H_v} dT$$

Ecuación 7.105

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_v}{Tv_{fg}}$$

Ecuación 7.106

Sustituyendo la Ecuación 7.105 y la Ecuación 7.106 en la Ecuación 7.104 se obtiene:

$$\frac{dv}{dP} = \frac{v_{fg}^2}{\Delta H_v^2} TC_p$$

Ecuación 7.107

Así, el flujo másico (Ecuación 7.108)³⁶ está determinado por la combinación de la Ecuación 7.107 con la Ecuación 7.102.

$$Q_m = \frac{\Delta H_v A}{v_{fg}} \sqrt{\frac{g_c}{TC_p}} \quad \text{Ecuación 7.108}$$

Pequeñas gotas de líquido también se forman en un jet de *flashing vapor*. Estas gotas de aerosol son fácilmente arrastradas por el viento y transportadas fuera del lugar de la liberación. Asumir que la cantidad de gotas formadas es igual a la cantidad de material *flasheado* es realizada con frecuencia.

7.3.6.4 Piscina de evaporación o ebullición

a) Estimación de la tasa de vaporización de un líquido

Los líquidos que contienen altas presiones de vapor se volatilizan rápidamente. Como resultado, se espera que la tasa de evaporación sea una función de la presión de vapor. La tasa de vaporización en un ambiente con aire estancado es proporcional a la diferencia entre la presión de saturación y la presión parcial del vapor en el aire (Ecuación 7.109).

$$Q_m \propto (P^{sat} - p) \quad \text{Ecuación 7.109}$$

Donde P^{sat} es la presión de saturación de vapor del líquido puro a la temperatura del líquido y p es la presión parcial del vapor del gas estancado por encima del líquido. Existe también una expresión más generalizada para la tasa de vaporización³⁷ (ver Ecuación 7.110):

$$Q_m = \frac{MKA(P^{sat} - p)}{R_g T_L} \quad \text{Ecuación 7.110}$$

³⁶ La temperatura de la Ecuación 7.108 es la temperatura absoluta de la ecuación de Clausius-Clapyron y no está asociada a la capacidad calorífica.

³⁷ Seven R. Hanna and Peter J. Drivas, *Guidelines for the Use of Vapor Cloud Dispersion Models* (New York: American Institute of Chemical Engineers, 1987).

En la Ecuación 7.110, Q_m es la tasa de evaporación (masa/tiempo), M es el peso molecular de la sustancia volátil pura, K es el coeficiente de transferencia de masa (longitud/tiempo) para un área A , R_g es la constante de los gases ideales, y, T_L es la temperatura absoluta del líquido.

En muchos casos, $P^{sat} \gg p$ y la Ecuación 7.110 se simplifica a la Ecuación 7.111. Esta ecuación se utiliza para el cálculo de la tasa de vaporización de una sustancia volátil en una vasija de proceso abierta o de un derrame de una sustancia líquida.

$$Q_m = \frac{MKAP^{sat}}{R_g T_L}$$

Ecuación 7.111

Para líquidos en ebullición, la tasa de ebullición está limitada por la transferencia de calor desde los alrededores al líquido en la piscina. El calor es transferido:

1. Desde el suelo por conducción
2. Desde el aire por conducción y convección
3. Por radiación del sol y/o fuentes adyacentes como fuego.

La etapa inicial de ebullición está controlada usualmente por la transferencia de calor desde el suelo. Este hecho es real para el caso de un derrame de líquido con punto de ebullición por debajo de la temperatura ambiente o de la temperatura del piso. La transferencia de calor desde el suelo se calcula a partir de una ecuación unidimensional para la conducción de calor dada por:

$$q_g = \frac{K_s(T_g - T)}{(\pi\alpha_s t)^{1/2}}$$

Ecuación 7.112

Donde, q_g es el flujo de calor desde el suelo (energía/área-tiempo), K_s es la conductividad térmica del suelo (energía/longitud-tiempo-grados), T_g es la temperatura del suelo (grados), T es la temperatura del líquido en la piscina (grados), α_s es la difusividad térmica del suelo (área/tiempo) y t es el tiempo transcurrido luego del derrame (tiempo).

La Ecuación 7.112 no se considera conservativa. Así, la tasa de evaporación se calcula asumiendo que todo el calor es usado para evaporar el líquido. Así,

$$Q_m = \frac{q_g A}{\Delta H_v} \quad \text{Ecuación 7.113}$$

Donde Q_m es la tasa de flujo másico (masa/tiempo), q_g es la transferencia de calor del suelo a la piscina, determinado por la Ecuación 7.112, A es el área de la piscina y ΔH_v es el calor de vaporización del líquido en la piscina (energía/masa).

7.4 Área de la fuente.

El área de la fuente está sujeta al tipo de liberación que se presente. Para el caso de una piscina, si no existe algún tipo de barrera de contención, la forma y tamaño de la piscina están determinados por el tipo de fuente y las características del suelo. Si un líquido es almacenado en un área confinada, el tamaño máximo de la piscina será el tamaño del área del confinamiento y tendrá su misma forma.

En el caso de una piscina, si esta cuenta con algún tipo de barrera de contención, el tamaño de la piscina es fijo. Si la barrera forma ángulos rectos debe utilizarse la siguiente expresión (Ecuación 7.114)³⁸ para el diámetro:

$$D = \sqrt{4 \frac{\text{área}_{\text{superficial de la piscina}}}{\pi}} \quad \text{Ecuación 7.114}$$

El radio efectivo de una piscina también puede ser calculado mediante:

$$\text{Radio} = \sqrt{\frac{A_{\text{confinamiento}}}{\pi}} \quad \text{Ecuación 7.115}$$

En el caso que no exista confinamiento, el líquido liberado formará una piscina de un diámetro establecido por el equilibrio entre una tasa de evaporación del líquido

³⁸ Con el fin de asumir que la piscina tiene forma circular.

cuyo valor sea igual a la tasa de liberación del líquido. El espesor de la piscina será una función de la rugosidad del suelo. Un valor mínimo de 5 milímetros puede ser asumido. El área máxima de una piscina sobre suelo en áreas no confinadas puede ser hasta de 1500 m² (Casal, 2008).

Cuando la liberación es un jet horizontal o vertical de líquido almacenado bajo presión, el área de la fuente es el área formada una vez se ha dado una expansión completa del material y éste ha alcanzado una presión igual a la presión ambiente. Si el material es almacenado y liberado como gas, se recomienda que la expansión se trate de forma adiabática y puede ser expresada de la siguiente forma (Ecuación 7.116):

$$A_{\text{Transversal}} = \frac{P_{\text{almacenamiento}}}{P_a} \frac{TS}{T_0} A_{\text{liberación}} \quad \text{Ecuación 7.116}$$

$A_{\text{liberación}}$ es el área de la ruptura del elemento de contención, $P_{\text{almacenamiento}}$ es la presión a la cual está almacenado el material, P_a es la presión del ambiente, TS es la temperatura del material en la fuente y T_0 es la temperatura de almacenamiento del material.

Cuando un líquido es almacenado bajo presión y la liberación se da como un jet de dos fases, el área de fuente es el área formada una vez se ha dado el *flasheo* y se han formado gotas de líquido para dar lugar a una mezcla de gotas y vapor. Para esta situación, tenemos que:

$$A = \rho_l \frac{A_{\text{liberación}}}{\rho_m} \quad \text{Ecuación 7.117}$$

ρ_l es la densidad del líquido del material de la fuente y ρ_m es la densidad de la mezcla líquido/vapor, que puede ser calculado mediante la Ecuación 7.118.

$$\rho_m = \frac{1}{\left[\frac{f_v}{\rho_v} + \frac{f_l}{\rho_l} \right]}$$

Ecuación 7.118

En el caso de una liberación instantánea el área de la fuente es el área de la fuente volumétrica ubicada en el plano con coordenadas x , y y z iguales a cero. Entonces, el área de la fuente estará definida por:

$$A = \frac{QTIS}{\rho_{inicial} H}$$

Ecuación 7.119

Donde $QTIS$ está definida como la masa de la fuente instantánea, H es la altura de la fuente y $\rho_{inicial}$ es la densidad inicial de la fuente. La Ecuación 7.120 permite calcular la densidad inicial para una liberación de vapor puro. La Ecuación 7.121 permite calcular la densidad inicial para una mezcla líquido/vapor.

Vapor

$$\rho_{inicial} = \frac{WMS}{P_a} / R_c TS$$

Ecuación 7.120

Mezcla líquido vapor

$$\rho_{inicial} = \rho_m$$

Ecuación 7.121

7.5 Duración de la fuente continua

Este parámetro especifica la duración de la liberación para una fuente continua: piscina o jet. No es usado en una liberación instantánea. El tiempo de la fuente continua depende del tipo de fuente, cantidad de material, tiempo de respuesta a la fuga, etc. Este parámetro puede ser establecido por el usuario o puede ser calculado mediante la sección Modelos Fuente (Sección 7.3.6).

7.6 Altura de la fuente

Para una piscina, este valor es cero. Para jets horizontales la altura de la fuente es la altura del centro del jet, para jets verticales la altura de la fuente es la altura real del jet o columna. En el caso de una fuente instantánea, esta altura es el resultado de la división entre el volumen de la fuente y su área.

7.7 Velocidad del viento del ambiente.

Para SLAB se tiene en cuenta la velocidad del viento medida a cualquier altura y se debe especificar posteriormente dicha altura. Para Britter-McQuaid, es la velocidad del viento medida a 10 metros sobre el nivel del suelo. Para este parámetro es recomendable tomar mediciones en tiempo real. En caso que no existan recursos para tomar esta medida en campo se tiene 2 opciones. La primera de ellas es la Escala de Beaufort (Tabla 7.8) la cual es una medida empírica de la velocidad del viento. Según el efecto percibido en tierra es posible determinar un rango de la velocidad del viento.

Tabla 7.8. Escala de Beaufort de la intensidad del viento tomado de (The Center for Innovation in Engineering and Science Education (CIESE)).

Número de Beaufort	Velocidad del viento (km/h)	Términos Usados en las Predicciones del NWS	Indicadores
0	0-2	Calma	Calma; el humo sube verticalmente.
1	2-5	Ventolina	La dirección se puede apreciar por la dirección del humo, pero no por medio de veletas.
2	6-12	Ligero	El viento se siente en el rostro, las hojas se mueven ligeramente; las veletas ordinarias se mueven con el viento.
3	13-20	Suave	Las hojas y las ramas delgadas se mueven constantemente; el viento extiende las banderas ligeras.
4	21-29	Moderado	Levanta polvo y papeles sueltos; las ramas pequeñas se mueven.
5	30-39	Fresco	Los árboles pequeños empiezan a balancearse; en los lagos pequeños se observan olas con crestas.
6	40-50	Fuerte	Se mueven las ramas grandes; los cables telefónicos silban; es difícil usar sombrillas.
7	51-61	Muy fuerte	Los árboles enteros se mueven; es incómodo caminar contra el viento.
8	62-74	Ventarrón	Se rompen las ramas de los árboles; generalmente no se puede avanzar.
9	75-87	Ventarrón Fuerte	Daños estructurales ligeros.
10	88-101	Temporal	Pocas veces se siente en tierra firme; los árboles son arrancados de raíz; ocurren daños estructurales considerables.
11	102-116	Borrasca	Casi nunca sucede en tierra firme; acompañado de daños graves generalizados.
12	117 o más	Huracán	Casi nunca sucede; acompañado de devastación.

La segunda opción es la información existente en el Distrito Capital que puede ser tomada en cuenta a partir de los datos que suministran portales el IDEAM (<http://www.sisaire.gov.co:8080/faces/mediciones/medicionesMeteorologicasDep.jsp> o <http://noreimako.ideam.gov.co:7782/ideamded/home.jsp>), la CAR (<http://200.21.21.36/amline/estacionessatelitales.htm>) y la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) a través de estaciones climatológicas y la información disponible en el portal de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) (<http://201.245.192.251:81/>).

La información obtenida a partir de las bases de datos de la CAR y la SDA fue incorporada al aplicativo SIG. Esta información corresponde a los datos de velocidad y dirección del viento de las diferentes estaciones climatológicas del Distrito Capital. En el aplicativo Modelo Zonas, en SIG, se encuentra disponible la capa "Estación de aire", la cual presenta el área de influencia de cada una de las estaciones en el Distrito Capital obtenida empleando el método de polígonos de Thissen. Adicionalmente, se encuentra disponible una tabla dinámica en Excel, la cual relaciona los datos históricos para velocidad y dirección del viento para las diferentes estaciones.

Estas estaciones cuentan con ubicaciones dentro del área de influencia de Bogotá y tan solo deben ser tenidas en cuenta en caso que el epicentro en el cual se ubica un punto de fuga accidental se encuentre dentro de dicha área. Cada zona de Bogotá tiene a su vez un área asignada como *área de influencia por estación*, donde en total se cuenta con 14 estaciones de la SDA y 3 de la CAR.

7.8 Clases de estabilidad

El comportamiento de la atmósfera de la Tierra está determinado por la capacidad dispersiva de las sustancias que en ella se encuentren. Esta capacidad depende de la turbulencia que exista, dado que a medida que esta aumente, así mismo aumentará la capacidad dispersiva. Las clases de estabilidad son una forma cualitativa de catalogar la capacidad dispersiva de la atmósfera, y que se ve afectada por fenómenos térmicos y fenómenos mecánicos. Estos factores son:

- Cambio de temperatura del aire con la altura, la hora del día y la cantidad de nubosidad (relacionada con la cantidad de radiación)
- Rugosidad de la superficie
- Velocidad del viento
- Según diferentes combinaciones de estos parámetros es posible obtener diferentes clases de estabilidad. Se tiene 5 categorías de velocidad del

viento superficial, 3 tipos de insolación diurna y 2 tipos de nubosidad nocturna. Según lo anterior es posible identificar 6 clases de estabilidad: las clases de estabilidad A, B y C, para condiciones inestables, D para neutras, y para condiciones estables la E y/o F.

Tabla 7.9. Clases de estabilidad de Pasquill-Gifford

Hora de día	Nubosidad	Clase de estabilidad	Interpretación
DIA	Sin nubes	A	Muy inestable
	Pocas nubes	B	Inestable
	Nublado	C	Ligeramente inestable
DIA/NOCHE	Nublado	D	Neutra
	Pocas nubes	E	Ligeramente estable
NOCHE	Sin nubes	F	Estable

Fuente: Adaptado de Crowl & Louvar, 2002.

8. DESARROLLO DE COMITÉS TÉCNICOS

Este capítulo comprende cada una de las dimensiones cubiertas por el presente Convenio, brindando una visión global de resultados y planteando algunas reflexiones para el desarrollo de iniciativa enfocadas al fortalecimiento del Sistema Distrital de Prevención y Atención de Emergencias.

El desarrollo de los comités técnicos constituye una herramienta de orientación, en donde los diferentes protagonistas del convenio, establecen metas y plazos para los diferentes puntos contemplados dentro del mismo. Dentro del comité técnico existen representantes de ambas partes: UNIANDES Y FOPAE. Por parte de la Universidad de los Andes se encuentran: FELIPE MUÑOZ Delegado del Rector de la Universidad de los Andes y Director de proyecto, JORGE MARIO GOMEZ Delegado del decano de la Facultad de Ingeniería y Director del Departamento de Ingeniería Química. Por parte del FOPAE se encuentran: DARWIN ORTIZ,¹ Delegado del representante legal FOPAE y Subdirector del Área Técnica y de Gestión, FARIDE SOLANO Responsable Grupo Industria- FOPAE, JESÚS ENRIQUE ROJAS Responsable Coordinación Sectorial - FOPAE, LINDON LOSADA PALACIOS Responsable Área de investigación y desarrollo.

De acuerdo con lo acordado previamente, las reuniones de comité técnico se llevaron a cabo durante la última semana de cada mes, de tal manera que se realizaron 6 reuniones de comité técnico, donde se desarrollaron los siguientes temas: Cronograma detallado de actividades del convenio, manejo de la información del convenio, solicitud información del sistema de información geográfica y manejo de la misma, compromisos de ambas partes, desarrollo y avances de herramienta computacional para la dispersión de nubes tóxicas, presentación de la herramienta de visualización de resultados de simulación en SIG.

Comité técnico 1 Se establece fecha de legalización e inicio del convenio. Se definen los integrantes del comité técnico y se establece un cronograma de trabajo. Se establece la necesidad de reuniones de carácter técnico. Se hace entrega del primer informe del convenio, en el cual se presenta un cronograma y los recursos humanos que estarán a lo largo de su desarrollo.

¹ LUCY ESPERANZA GONZALEZ estuvo vinculada a la entidad hasta el mes de abril de 2011 como Delegada del representante legal FOPAE y Subdirectora del Área Técnica y de Gestión, cuando fue reemplazada por DARWIN ORTIZ.

- Comité técnico 2 Se muestra la revisión de modelos disponibles, los criterios de selección de modelos y la conceptualización para el desarrollo de una herramienta de simulación.
- Comité técnico 3 Se realiza una retroalimentación del segundo informe del convenio. Se solicitan actualizaciones en el software en el que se desarrolla la herramienta de visualización ArcGIS de la versión 9.3 a 10.
- Comité técnico 4 Se presenta SiDiG – Simulación de Dispersión de Gases, herramienta desarrollada como objeto de este convenio. Se presenta una versión de la herramienta de visualización de resultados de simulación en ArcGIS para versión 10.
- Comité técnico 5 Se presentan avances y ajustes de la herramienta computacional SiDiG según requerimientos del FOPAE. Se entrega copia de la herramienta para nuevas pruebas. Se tratan temas de registro de Software.
- Comité técnico 6 Se tratan las jornadas de capacitación de manejo de las herramientas de simulación SiDiG y de visualización de resultados en SIG. Se discute el tema de construcción de escenarios. Se trata el tema de Modelos Fuente y su inclusión a la metodología de trabajo.
- Comité técnico 7 Se revisa el tema de la obtención de información real para la construcción de escenarios. Se entrega el aplicativo SIG, recibido a conformidad por el FOPAE. Adicionalmente se lleva a cabo una revisión de las actividades realizadas durante el mes de abril entre las cuales se encuentra la jornada de capacitación en modelos fuente.

Comité técnico 8 Se entrega el informe final. Se entregan junto al informe final el aplicativo SIG, el software SiDiG, las actas de los comités, las presentaciones de las capacitaciones y las memorias de cálculo. Entre las actividades pendientes se contempla la divulgación de los resultados en las SDPAE.

Es así como los diferentes comités técnicos permitieron el desarrollo del convenio, mediante un proceso detallado y sistemático, de cada una de las dimensiones cubiertas por el proyecto.

En el Anexo C están disponibles las actas de los comités desarrollados a lo largo del convenio.

8.1 Documentos referencia

Los documentos de referencia brindan una base común de análisis para todos aquellos involucrados en los procesos de gestión de riesgo público. La definición de un método o métodos internacionalmente reconocidos para la evaluación de consecuencias, promueve la construcción de un conocimiento común y de un espacio de reflexión para las autoridades de vigilancia y control, y los responsables de actividades de alto riesgo. Métodos unificados permiten a su vez que los análisis de los resultados de afectación al territorio se vuelvan comparables, brindando mejores elementos para la toma de decisiones, con el objetivo de una más eficiente administración del territorio.

Como producto de este Convenio se seleccionaron métodos internacionalmente reconocidos para la simulación de dispersión de gases tóxicos, más densos que el aire. Al mismo tiempo se comenzó a determinar los criterios para la evaluación de consecuencias por la ocurrencia de este tipo de eventos, lo que permiten estimar áreas de influencia de nubes tóxicas.

Si bien la propuesta de métodos es amplia a nivel internacional, la selección de un modelo o de varios específicos se hace necesaria. Esta decisión no excluye la selección y aplicación futura de modelos diferentes y sólo brinda un elemento de referencia al conjunto de autoridades distritales.

Para la selección de los métodos se tuvo en cuenta consideraciones tales como: simplicidad del método, exactitud para la estimación de efectos, accesibilidad y el

estado del conocimiento del distrito para la estimación de riesgo tecnológico. Este proceso de selección fue producto de una discusión permanente entre el FOPAE y los especialistas de la Universidad de los Andes.

8.2 Análisis de casos

La elaboración y análisis de casos entre el FOPAE y la Universidad de los Andes permitieron la generación de una memoria de cálculo secuencial y estructurada que permite al lector seguir paso a paso un procedimiento sugerido, aplicable a casos reales con condiciones similares. De acuerdo al convenio firmado entre la Universidad de los Andes y el FOPAE, el alcance del proyecto incluye la construcción de dos (2) escenarios seleccionados por el FOPAE, que permiten evaluar la intensidad de los efectos tóxicos por dispersión de gases tóxicos más densos que el aire. Sin embargo, con el fin de abarcar diferentes tipos de accidentes se presentan los resultados de cuatro (4) escenarios planteados, dos (2) para cloro y dos (2) para amoniaco, y la memoria de cálculo para un (1) escenario de cloro y para un (1) escenario de amoniaco.

- Caso Amoniaco

El planteamiento del caso se realizó teniendo en cuenta la mayor cantidad de amoniaco almacenada en el distrito, la cual corresponde a 10 toneladas. Se consideró este escenario porque este representa un riesgo mayor en caso de fuga o derrame.

La fuga fue planteada entre la unidad de transporte del amoniaco y la unidad para su almacenamiento y procesamiento. El primer escenario contempla la fuga en la tubería de conexión entre las dos unidades; el segundo escenario consiste en el daño en la válvula de trasiego. Al presentarse la fuga, por la naturaleza de la sustancia se genera una piscina de líquido que comienza a evaporarse inmediatamente.

- Caso de cloro

Para el primer escenario de cloro se consideró un evento menor pero con mayor número de reportes en el distrito. La fuga en esta ocasión fue planteada en un cilindro de almacenamiento y transporte de cloro líquido de 68 kg. Un daño o mal funcionamiento en la válvula generaría la liberación de la sustancia hacia la

atmósfera y de esta forma se presentaría la emisión y propagación de la sustancia en el ambiente.

El segundo escenario fue planteado como una fuga en un cilindro de 1 tonelada. De este escenario solo se presentan los resultados.

La memoria de cálculos se encuentra disponible en el Anexo B Casos de estudio - Información de almacenamiento y memorias de cálculo.



8.3 Herramientas computacionales

El desarrollo de herramientas computacionales facilita a los analistas la simulación de escenarios. Este proyecto comprendió la conceptualización y desarrollo de una herramienta computacional para la evaluación de *efectos tóxicos por dispersión de gases más densos que el aire*. Esta herramienta fue desarrollada en dos módulos, uno de simulación (denominado SiDiG) y otro de visualización de resultados desarrollado como un Addin para ArcGIS. Estos instrumentos incluyen únicamente los modelos seleccionados como apropiados para la finalidad del presente convenio y realizan una evaluación de consecuencias básica. Su código está abierto y ha sido diseñado como una herramienta de uso público, por lo tanto la responsabilidad de su uso y resultados recae totalmente en el analista. Su objeto es el de brindar una herramienta para la simulación de la dispersión de contaminantes a las industrias, para la construcción de planes de atención de emergencia, los cuales a su vez servirán de referencia al distrito en sus procesos de estimación preliminar de riesgo público y en la atención de emergencias por emisiones de gases tóxicos. Adicionalmente, el módulo construido en ArcGIS permite consultar la afectación correspondiente a las dispersiones en una ubicación específica en el Distrito Capital.

SiDiG fue conceptualizada y programada en Java, incluyendo dos modelos de dispersión de gases densos (SLAB y Britter-McQuaid) y teniendo en cuenta para el análisis de consecuencias valores de AEGLs (Niveles umbrales para exposiciones agudas a una sustancia) como referencia.

8.4 Acompañamiento

Durante todo el proceso de desarrollo del presente convenio el trabajo mancomunado interdisciplinario entre el FOPAE y la Universidad de los Andes ha generado un avance significativo en el conocimiento del riesgo tecnológico,

 <p>ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. SOBERANO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

aportando a cada una de estas instituciones elementos técnicos para el modelado y la simulación de eventos críticos no deseados, y enmarcar sus resultados dentro de una concepción integral para la administración de riesgo público en el Distrito Capital.

Los múltiples escenarios de concertación y acompañamiento, permitieron generar una base común de análisis constituida por un glosario de términos compartidos, procesos de análisis armonizados, un conjunto de métodos de referencia y criterios unificados para la evaluación de consecuencias. Además, para el aumento en la operatividad de las herramientas de simulación, se tuvo en cuenta la información generada por otras instituciones distritales diferentes al FOPAE, que aumentan el valor agregado a los esfuerzos distritales por el trabajo en armonía.

En el Capítulo 9 se presenta en mayor detalle el proceso de acompañamiento de la Universidad de los Andes al FOPAE.

9. DIVULGACIÓN Y FORTALECIMIENTO TÉCNICO

En el marco del Convenio especial de cooperación N° 453 de ciencia y tecnología, entre la Universidad de los Andes y el FOPAE se realizaron diferentes actividades con el fin de lograr los objetivos propuestos. Las actividades conjuntas de divulgación y fortalecimiento técnico se enfocaron principalmente en los ejes presentados a continuación.

En el Anexo D (Actas Reuniones) se presentan las actas de las reuniones llevadas a cabo en el marco del convenio para la divulgación y fortalecimiento técnico.

9.1 Construcción y socialización del software de simulación SiDiG

Como herramienta fundamental para la determinación de la dispersión de sustancias tóxicas más densas que el aire se construyó el software SiDiG en el lenguaje de programación Java. Para la construcción de la herramienta se realizó inicialmente la revisión de los modelos disponibles para la simulación de gases más densos que el aire. Estos modelos fueron socializados al FOPAE, presentando ventajas y desventajas. Se seleccionaron los modelos aplicables, considerando los modelos que han arrojado mejores resultados de dispersión. Como elemento de selección se consideraron adicionalmente los requerimientos computacionales y el tiempo de simulación requerido.

Al finalizar el proceso de construcción de la herramienta se realizó la capacitación del grupo industria del FOPAE en el manejo de esta.

9.2 Construcción del aplicativo SIG, Modelo Zonas

Con el fin de determinar la afectación de las nubes tóxicas en el Distrito Capital se construyó el aplicativo Modelo Zonas. Las capas de cartografía, población e interés público y ambiental fueron seleccionadas entre la Universidad de los Andes y el FOPAE.

Al igual que con la herramienta SiDiG, se realizó la capacitación del grupo industria y el grupo de informática del FOPAE. Esta capacitación incluyó la instalación del aplicativo y la integración con los resultados arrojados por el SiDiG.

9.3 Capacitación en los modelos fuente

Para lograr un mejor manejo de la herramienta de simulación se realizó la revisión de los modelos fuente empleados para la determinación de las tasas de emisión desde la fuente de las sustancias tóxicas. Se hizo particular énfasis en los modelos considerados para la construcción de los escenarios de cloro y amoniaco.

9.4 Construcción de escenarios de aplicación

Los escenarios considerados en el convenio corresponden a cloro y amoniaco. Los pasos contemplados en la construcción de estos escenarios fueron presentados ante el grupo industria del FOPAE con el objetivo de reforzar el manejo de las herramientas construidas.

Las fechas de las reuniones llevadas a cabo para el cumplimiento de las actividades presentadas en los numerales anteriores se presentan en la Tabla 9.1.





	<p style="text-align: center;">CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	
---	--	---

Tabla 9.1. Resumen de reuniones y capacitaciones realizadas para la divulgación y fortalecimiento técnico del convenio.

FECHA	LUGAR	TEMA	ASISTENTES	OBSERVACIONES
02/08/10	Universidad de los Andes	Entrega propuesta	Universidad de los Andes - Sistemas Sostenibles	
15/10/10	Universidad de los Andes	Reconocimiento, primeras tareas	Universidad de los Andes - Sistemas Sostenibles	
03/11/10	FOPAE	Reunión 1	Grupo Industria del FOPAE- Universidad de los Andes	Se presentó el grupo de trabajo. Se introdujeron diferentes modelos de dispersión, los cuales son contemplados para la construcción del software de simulación.
19/11/10	FOPAE	Reunión 2	Grupo Industria del FOPAE - Grupo Informática del FOPAE - Universidad de los Andes.	Se presentó el grupo de trabajo ante el grupo de informática y el adelanto en el software de simulación desarrollado. Se discutió la compatibilidad con los recursos informáticos del FOPAE. Se contempló la introducción de los resultados en Google Maps.

26/11/10	Universidad de los Andes	Reconocimiento, avances, nuevas tareas	Universidad de los Andes - Sistemas Sostenibles	
30/11/10	FOPAE	Reunión 3	Grupo Industria del FOPAE - Grupo Informatica del FOPAE - Universidad de los Andes.	Revisión de capas de información geográfica, conexión de la herramienta de simulación con ArcGis. Solicitud información. Definición de la plantilla para entrega de resultados por simulación.
11/12/10	Universidad de los Andes	Avance Módulo geográfico, observaciones y compromisos	Universidad de los Andes - Sistemas Sostenibles	
18/03/11	FOPAE	Reunión 4	Grupo Industria del FOPAE- grupo Informatica del FOPAE- Universidad de los Andes.	Revisión de los errores de la herramienta SIG. Se continúa trabajando sobre la herramienta SIG.
23/03/11	FOPAE	Capacitación herramienta SiDiG	Universidad de los Andes - Grupo Industria del FOPAE	Se realizó la capacitación de la herramienta SiDiG. Esta capacitación la realizó Felipe Muñoz, Nathalia Torres y Claudia Moreno, al igual que todo el grupo industria estuvieron presentes.

24/03/11	FOPAE	Capacitación herramienta SIG	Grupo Industria del FOPAE- grupo Informatica del FOPAE- Universidad de los Andes.	Se realizó la capacitación de la herramienta SIG, con el grupo de informática.
11/04/11	FOPAE	Reunión 5	Sistemas Sostenibles y Grupo Informática del FOPAE	Revisión de la herramienta SIG. Instalación y verificación de funcionalidad
11/04/11	FOPAE	Resultados del escenario de amoniaco	Universidad de los Andes - FOPAE	Se presentaron los resultados de la evaluación preliminar del escenario de amoniaco.
13/04/11	FOPAE	Reunión 6	Sistemas Sostenibles- Grupo Informática del FOPAE- Grupo Industria del FOPAE y Universidad de los Andes	Revisión de los últimos detalles de la herramienta SIG. Instalación correcta y a satisfacción.
18/04/11	FOPAE	Revisión de los modelos fuente y cálculos de los escenarios de amoniaco y cloro	Universidad de los Andes- Grupo Industria del FOPAE	Se revisaron los modelos fuente que podrian ser aplicados al amoniaco y al cloro, y se realizó énfasis en porque se utilizaron los modelos que se seleccionaron.

 <p>ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. SOBERANO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

23/05/11	FOPAE	Escenarios finales de cloro y amoniaco	Universidad de los Andes - Grupo Industria del FOPAE	Se expusieron los resultados finales, las memorias de cálculo, la simulación en SiDiG y la implementación en SIG de los escenarios de cloro y de amoniaco.
----------	-------	--	--	--

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1 Conclusiones

El proyecto de ciencia y tecnología “Mejoramiento en el Conocimiento en Riesgo Tecnológico – Accidentes Industriales Mayores en el Distrito Capital. Eventos con Nube Tóxica” desarrollado en conjunto entre el FOPAE y la Universidad de los Andes, permitió el desarrollo de herramientas para el análisis y control de emergencias industriales en el Distrito Capital.

Como productos de este proyecto se construyeron un software de simulación de dispersión de gases densos y un aplicativo SIG para para la afectación de la dispersión de los gases.

De los modelos evaluados para determinar la dispersión de sustancias tóxicas más densas que el aire se seleccionaron los modelos SLAB y Britter McQuaid, los cuales, por sus requerimientos computacionales, aplicabilidad a la dispersión de gases más densos que el aire y accesibilidad a los datos de entrada, se consideraron las mejores opciones para la construcción de la herramienta de simulación.

Además, la validación de los modelos permitió determinar que estos arrojan resultados útiles para la identificación de variables involucradas en la dispersión de gases más densos que el aire. Sin embargo, esta misma validación permitió conocer las limitaciones y la confiabilidad al momento de analizar los resultados esperados.

El entendimiento e interpretación de los modelos fuente resulta ser una estrategia fundamental para determinar las tasas de emisión de sustancias desde la fuente. Los modelos fuente a su vez ayudan en la comprensión del fenómeno físico que ocurre en la unidad de proceso involucrada en la fuga y así poder tomar medidas más acertadas para su control.

La construcción de los escenarios de cloro y amoniaco, junto a la evaluación de su afectación a partir de la selección de dos epicentros en el distrito, permitió ejemplificar la aproximación a la evaluación de escenarios generados por la emisión de una sustancia tóxica más densa que el aire.

A pesar que el software construido (SiDiG) y el aplicativo SIG (Modelo Zonas) son herramientas de uso sencillo; los datos ingresados, así como su análisis, requieren criterio ingenieril, el cual debe ir soportado en el entendimiento del fenómeno que se puede presentar.

Los escenarios evaluados por los industriales deben ser seleccionados de acuerdo a la *probabilidad* de ocurrencia, a la *intensidad* del daño causado, y a la *vulnerabilidad* del medio al cual pueden afectar.

El desarrollo de comités técnicos y el proceso de acompañamiento fueron claves en el desarrollo de las diferentes tareas y en el cumplimiento de los objetivos del convenio puesto que permitieron que se lograran acuerdos entre las dos partes para obtener los mejores resultados a partir de los recursos disponibles.

El aplicativo diseñado en SIG para determinar la afectación de las concentraciones evaluadas en el SiDiG calcula el número de habitantes involucrados en el área cubierta por la nube (considerando la población censada por predio, sin incluir población flotante); sin embargo, no proporciona una cifra de víctimas, heridos y afectados. Al igual que las herramientas de libre acceso como es el caso de ALOHA®, entre otros programas diseñados para determinar la afectación, esta información no se suministra debido a la inexactitud en la valoración. El número real de víctimas, heridos y afectados depende de la exposición de cada individuo al contaminante, de tal forma que edificaciones con un mejor aislamiento proporcionarán mayor protección a los ocupantes. Teniendo en cuenta que este punto se considera por su relación directa con la movilización de recursos para atender la emergencia, proporcionar una cifra en este sentido podría llevar a un mal manejo de estos recursos y a una atención de emergencias ineficiente.

Los diferentes modelos construidos en el marco del convenio, al igual que los modelos de libre distribución y la GRE, son herramientas de soporte para la atención de emergencias. Los resultados arrojados, el análisis y las decisiones tomadas a partir de estos son responsabilidad del analista, el cual debe ser consciente de las ventajas y desventajas de cada uno de estos.

10.2 Recomendaciones

El Convenio Especial de Cooperación de Ciencia y Tecnología entre el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá- FOPAE y la Universidad de los Andes cumplió con los objetivos propuestos. Sin embargo, es importante seguir trabajando sobre el desarrollo de herramientas computacionales que permitan el análisis de posibles situaciones de emergencia a nivel industrial y en el análisis del riesgo asociado, de esta forma las medidas de control serán cada vez más efectivas y acertadas.

Para lograr un buen manejo de las herramientas producto del convenio es fundamental comprender los procesos de los cuales son resultado. Por lo tanto,

los encargados de su manejo y el análisis de los resultados obtenidos a partir de la simulación deben ser críticos y tener la formación necesaria para producir resultados confiables.

Antes de emplear el software de simulación (SiDiG) o el aplicativo en SIG (Modelo Zonas), es fundamental leer y comprender el informe final del proyecto. En este no solo se presentan los manuales de uso e instalación, sino que este representa una guía para la integración de las herramientas y el análisis de los resultados obtenidos. Adicionalmente, el informe presenta los parámetros para la obtención de los datos de entrada al SiDiG y al aplicativo SIG. Estos son una herramienta fundamental para la aproximación a datos reales en la construcción de escenarios, evitando sobredimensionar el escenario con datos conservativos.

11. ANEXOS

Anexo A Herramientas Computacionales

El objetivo de este anexo es realizar una descripción de la herramienta computacional de simulación desarrollada, "SiDiG"; y del aplicativo SIG implementado en ArcMap para la identificación de los elementos afectados a nivel del Distrito, "Modelo Zonas". De igual manera, se simularán ejemplos existentes y documentados para realizar una comparación apropiada de los resultados obtenidos y determinar si la programación de los modelos es adecuada.

A.1. SiDiG

A.1.1 Diseño de la herramienta computacional

La herramienta computacional SiDiG fue desarrollada en su totalidad en el lenguaje de programación Java debido a las ventajas que ofrece en cuanto a la construcción de una interfaz gráfica amigable al usuario. En la Sección A.1.5 se encuentra el manual de uso de la herramienta de simulación SiDiG, el cual cuenta con una interfaz para la simulación y visualización de resultados de dispersión de la sustancia. Los resultados obtenidos pueden ser incorporados a la herramienta de visualización Modelo Zonas, la cual permite obtener información adicional de la afectación sobre el Distrito Capital, esta herramienta se describe en la Sección A.2.

El objetivo de la herramienta es simular escenarios de emisión, de sustancias tóxicas más densas que el aire, ingresando datos de una manera sencilla para cualquiera de los modelos con los que se desee realizar la simulación y así poder ejecutar la herramienta habilitando la opción de observar isocontornos de concentración, distancias seguras y ancho máximo de una nube.

Es importante en este caso saber a qué concentraciones se desea calcular los isocontornos de concentración, teniendo tanto la opción de que el usuario seleccione concentraciones de interés como concentraciones preestablecidas en el programa las cuales corresponden a valores mundialmente reconocidos para el análisis de riesgos de una emergencia. Por lo tanto, para ello se decidió trabajar con unos valores determinados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA por su sigla en inglés) llamados AEGL (Acute Exposure Guideline Levels). Estos valores representan el umbral de exposición para el

público general y son aplicables a periodos de exposición en una emergencia variando de 10 minutos a 8 horas.

A.1.2 Diseño del modelo SLAB

En la Figura A. 1 se tienen en orden los pasos iniciales que toma la herramienta computacional para desarrollar los cálculos de SLAB. Primero realiza una inicialización de las variables y arreglos en donde se almacenarán los resultados. A continuación se calculan los parámetros de estabilidad, es decir, si el usuario desea trabajar con las clases de estabilidad de Pasquill-Gifford, el programa determina el valor del inverso de la longitud de Monin-Obukhov; mientras que si el usuario decide construir el escenario utilizando el inverso de la longitud de Monin-Obukhov, el programa determina en un rango de 1-6 el valor de la clase de estabilidad de Pasquill-Gifford. Este cálculo se realiza de manera interna en el programa. En estas ecuaciones L_{a0}^{-1} es la longitud de Monin-Obukhov ambiental al nivel del suelo, y debido a que la función de la clase de estabilidad, z_L , depende de la clase de estabilidad de Pasquill-Gifford, se puede realizar esta conversión. A continuación se calculan parámetros varios, tales como parámetros meteorológicos, la altura de la capa de mezcla, se inicializa la función de velocidad y la función de fricción. Por último, se determina el tipo de fuente de acuerdo al ingreso del usuario y se inicia el cálculo principal.

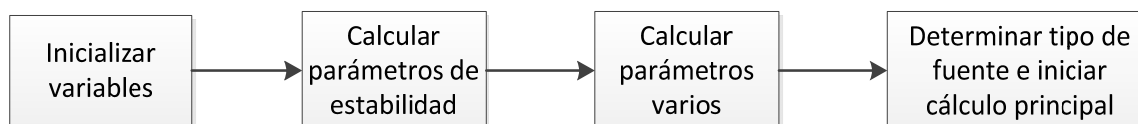


Figura A. 1. Diagrama de flujo en el que se tiene el orden de los pasos de cálculo iniciales de SLAB.

Los pasos a seguir dependen del tipo de fuente determinado por el usuario. El primer caso es la emisión por una piscina evaporándose, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura A. 2. Allí se tiene que una vez determinado el tipo de fuente se realiza la inicialización de la piscina (pool). A continuación el programa entra automáticamente a realizar el cálculo de la dispersión en el modo de pluma en estado estable. Sin embargo, es necesario realizar primero este cálculo en la región de la fuente. Este cálculo se lleva a cabo integrando las ecuaciones de conservación en estado estacionario. Una vez terminado este cálculo, se continúa en el modo de dispersión en estado estable pero se realiza el cálculo en la región de campo cercano.

Después el programa realiza una verificación, dependiendo de la duración de la emisión, el cálculo puede continuar en el modo de dispersión de puff en estado transiente (una vez haya terminado la emisión) integrando las ecuaciones de conservación en estado transiente y terminando por calcular la concentración volumétrica promediada en el tiempo. Por el otro lado, se tiene que si la duración de la emisión supera la distancia para la que se interesa conocer las propiedades de la nube, el programa concluye determinando la concentración volumétrica promediada en el tiempo.

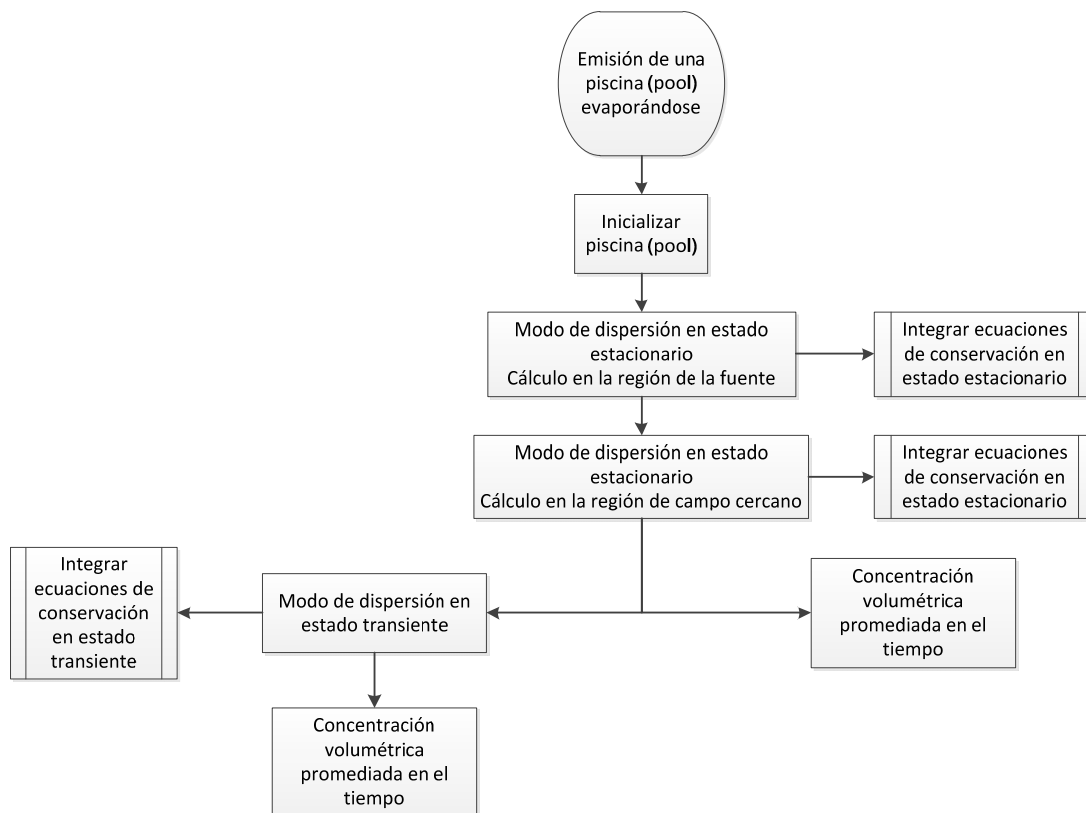


Figura A. 2. Diagrama de flujo para el caso de una piscina (pool) evaporándose.

En el segundo caso, la emisión de un jet horizontal (Figura A. 3), el primer paso que se toma es la inicialización del jet horizontal. A continuación, se realizan los cálculos de dispersión en el modo de pluma en estado estable por medio de la integración de las ecuaciones de conservación en estado estacionario. El término del cálculo para este caso es similar al del caso de la piscina evaporándose: dependiendo de la duración de la emisión el programa puede continuar los cálculos en el modo de puff en estado transiente concluyendo con el cálculo de la concentración volumétrica promediada en el tiempo.

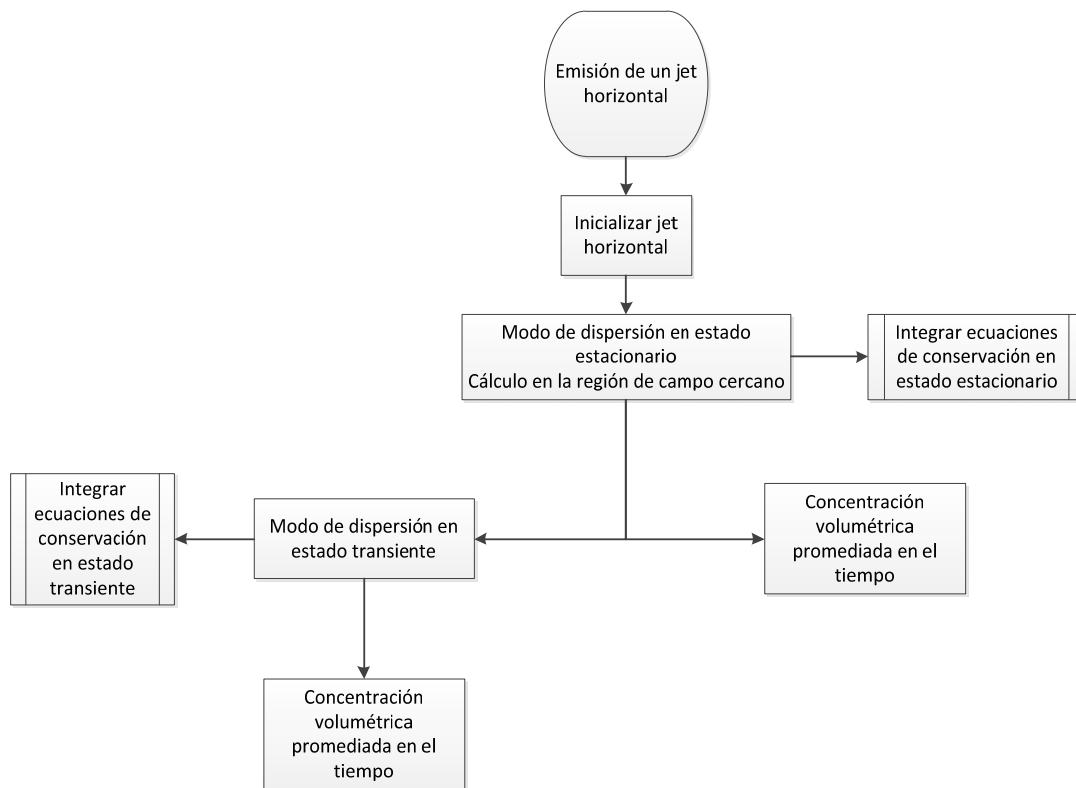


Figura A. 3. Diagrama de flujo para el caso de un jet horizontal.

En el tercer tipo de fuente, la emisión de un jet vertical, tiene un flujo de cálculo similar al jet horizontal a excepción de una diferencia: al iniciar el proceso se realiza primero el cálculo de la elevación de la pluma, en donde se puede continuar como un jet horizontal si la elevación es pequeña o se continua con la interpolación de la elevación de la pluma. En la Figura A. 4 se muestra el diagrama de flujo para el caso del jet vertical.

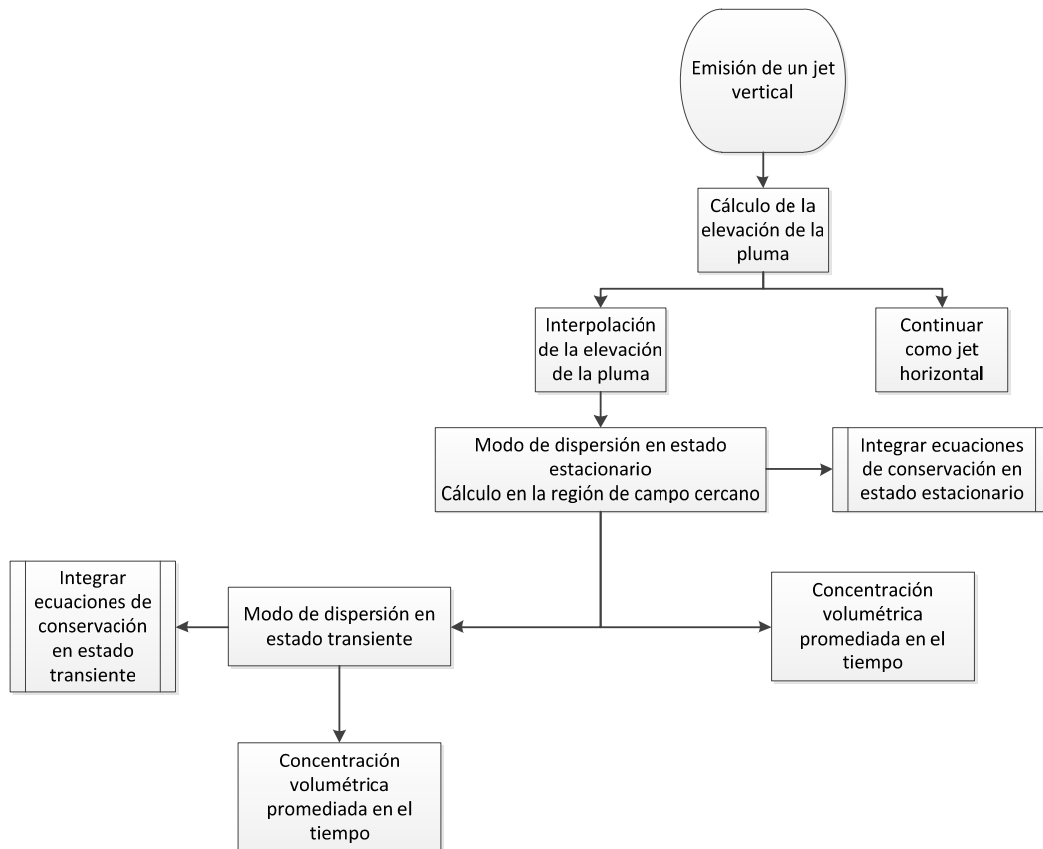


Figura A. 4. Diagrama de flujo para el caso de un jet vertical.

En el último caso, la emisión instantánea o de corta duración, todos los cálculos se llevan a cabo en el modo de puff en estado transiente. Por lo tanto, los pasos que se siguen son: primero se inicializa la emisión instantánea, después se calcula la dispersión integrando las ecuaciones de conservación en estado transiente. Por último, al igual que en todos los casos, se termina calculando la concentración volumétrica promediada en el tiempo. Este diagrama de flujo se tiene en la Figura A. 5.

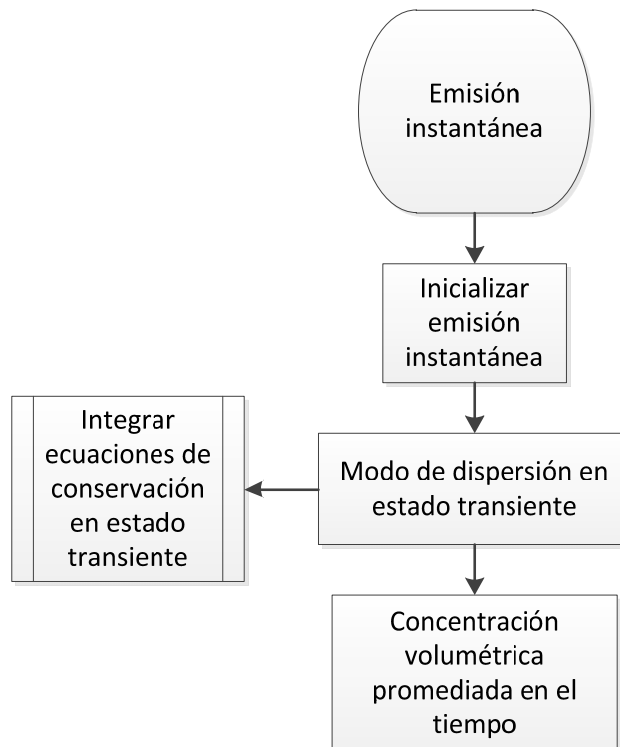


Figura A. 5. Diagrama de flujo para una emisión instantánea.

A.1.2.1 Adaptaciones propias al modelo SLAB

Adicional a la ejecución del modelo SLAB, se requirió poder determinar isocontornos de concentración a partir de una concentración (en partes por millón) y altura (en metros) dada. El modelo SLAB permite calcular la concentración volumétrica en cualquier punto espacial y tiempo de simulación a partir de la siguiente ecuación:

$$C(x, y, z, t) = CC(x) \times [\text{erf}(XA) - \text{erf}(XB)] \times [\text{erf}(YA) - \text{erf}(YB)] \times [e^{-ZA^2} + e^{-ZB^2}]$$

Ecuación A. 1

Donde $C(x, y, z, t)$ es la concentración (fracción volumétrica) en (x, y, z, t) , x es la distancia en la dirección del viento en metros, y es la distancia de viento cruzado

en metros, z es la altura en metros y t es el tiempo en segundos. Adicionalmente, se tiene:

$$XA = \frac{x - XC + BX}{\sqrt{2}BETAX} \quad \text{Ecuación A. 2}$$

$$XB = \frac{x - XC - BX}{\sqrt{2}BETAX} \quad \text{Ecuación A. 3}$$

$$YA = \frac{y + B}{\sqrt{2}BETAC} \quad \text{Ecuación A. 4}$$

$$YB = \frac{y - B}{\sqrt{2}BETAC} \quad \text{Ecuación A. 5}$$

$$ZA = \frac{z - ZC}{\sqrt{2}SIG} \quad \text{Ecuación A. 6}$$

$$ZB = \frac{z + ZC}{\sqrt{2}SIG} \quad \text{Ecuación A. 7}$$

Donde $CC(x)$, $B(x)$, $BETAC(x)$, $ZC(x)$, $SIG(x)$, $XC(t)$, $BX(t)$ y $BETAX(t)$ son parámetros de dispersión calculados en el modelo SLAB.

Por lo tanto, para calcular el isocontorno de concentración es necesario realizar dos cálculos, primero, calcular la función de error $\text{erf}(x)$ de manera numérica y encontrar, a partir de una concentración y una altura dada, el eje y para varias distancias en la dirección del viento (eje x) y poder dibujar así el isocontorno de concentración.

La función de error $\text{erf}(x)$ está dada por:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad \text{Ecuación A. 8}$$

Para realizar su cálculo se utilizó el método compuesto de la regla de Simpson, el cual divide el intervalo de integración en pequeños subintervalos y realiza la sumatoria de la siguiente manera:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + 2f(x_4) + \dots + 4f(x_{n-1}) + f(x_n)]$$

Ecuación A. 9

Donde h es el paso dado por:

$$h = \frac{b - a}{n}$$

Ecuación A. 10

De igual manera, $x_0 = a$ y $x_n = b$. El valor n debe ser un número par y determina el número de subintervalos en el que se desea dividir el intervalo $[a, b]$. En el programa diseñado se trabaja con $n = 1024$ y arroja muy buenos resultados.

Por otro lado, para determinar los valores de la distancia de viento cruzado (eje y) se utilizó un método numérico para encontrar la raíz de una función llamado el método de bisección. El método aplica cuando se desea solucionar la ecuación $f(x) = 0$ para una variable x , donde f es una función continua. En este caso, la función para la cual se encontrará la raíz es:

$$C(x, y, z, t) - CC(x) \times [\text{erf}(XA) - \text{erf}(XB)] \times [\text{erf}(YA) - \text{erf}(YB)] \times [e^{-ZA^2} + e^{-ZB^2}] = 0$$

Ecuación A. 11

Donde la variable desconocida es y . De esta manera, a partir de una concentración dada (para convertir una concentración en partes por millón a fracción volumétrica se divide por un millón), $C(x, y, z, t)$ y una altura dada, z , es posible determinar el isocontorno de concentración.

A.1.3 Diseño del modelo de Britter-McQuaid

Con el modelo de Britter-McQuaid se tiene el mismo objetivo que con el modelo SLAB: determinar isocontornos de concentración a partir de una concentración dada. Este procedimiento es más simple que aquel utilizado en el modelo SLAB

pues no utiliza métodos numéricos. Dada una concentración se puede calcular, tanto para emisiones instantáneas como para emisiones continuas, la distancia segura utilizando los nomogramas introducidos en el capítulo 5 del presente documento el cual hace referencia al ANÁLISIS DE RIESGOS: ÁREA DE INFLUENCIA DE EFECTOS TÓXICOS POR DISPERSIÓN DE GASES MÁS DENSOS QUE EL AIRE (NUBE TÓXICA) (Figura 5.7 y Figura 5.10). Sin embargo, se utilizaron regresiones para realizar este cálculo de manera automática. Las regresiones se tomaron de (Crowl & Louvar, 2002) y se muestran en la Tabla A. 1 y la Tabla A.2.

Tabla A. 1. Ecuaciones utilizadas para aproximar las curvas en las correlaciones de Britter-McQuaid para emisiones continuas. Recuperado de (Crowl & Louvar, 2002).

Relación de concentración (c_m/c_0)	Rango válido para $\alpha = \log \left(\frac{g_0^2 v_0}{u^5} \right)^{1/5}$	$\beta = \log \left[\frac{x}{(v_0/u)^{1/2}} \right]$
0.1	$\alpha \leq -0.55$	1.75
	$-0.55 < \alpha \leq -0.14$	$0.24\alpha + 1.88$
	$-0.14 < \alpha \leq 1$	$0.50\alpha + 1.78$
0.05	$\alpha \leq -0.68$	1.92
	$-0.68 < \alpha \leq -0.29$	$0.36\alpha + 2.16$
	$-0.29 < \alpha \leq -0.18$	2.06
0.02	$-0.18 < \alpha \leq 1$	$-0.56\alpha + 1.96$
	$\alpha \leq -0.69$	2.08
	$-0.69 < \alpha \leq -0.31$	$0.45\alpha + 2.39$
0.01	$-0.31 < \alpha \leq -0.16$	2.25
	$-0.16 < \alpha \leq 1$	$-0.54\alpha + 2.16$
	$\alpha \leq -0.70$	2.25
0.01	$-0.70 < \alpha \leq -0.29$	$0.49\alpha + 2.59$
	$-0.29 < \alpha \leq -0.20$	2.45
	$-0.20 < \alpha \leq 1$	$-0.52\alpha + 2.35$
0.005	$\alpha \leq -0.67$	2.40
	$-0.67 < \alpha \leq -0.28$	$0.59\alpha + 2.80$
	$-0.28 < \alpha \leq -0.15$	2.63
0.002	$-0.15 < \alpha \leq 1$	$-0.49\alpha + 2.56$
	$\alpha \leq -0.69$	2.6
	$-0.69 < \alpha \leq -0.25$	$0.39\alpha + 2.87$
0.002	$-0.25 < \alpha \leq -0.13$	2.77
	$-0.13 < \alpha \leq 1$	$-0.50\alpha + 2.71$

Tabla A. 2. Ecuaciones utilizadas para aproximar las curvas en las correlaciones de Britter-McQuaid para emisiones instantáneas. Recuperado de (Louvar 2002).

Relación de concentración (C_m/C_0)	Rango válido para $\alpha = \log \left(\frac{g_0 V_0^{1/3}}{u^2} \right)^{1/2}$	$\beta = \log \left[\frac{x}{V_0^{1/3}} \right]$
0.1	$\alpha \leq -0.44$	0.70
	$-0.44 < \alpha \leq 0.43$	$0.26\alpha + 0.81$
	$0.43 < \alpha \leq 1$	0.93
0.05	$\alpha \leq -0.56$	0.85
	$-0.56 < \alpha \leq 0.31$	$0.26\alpha + 1.0$
	$0.31 < \alpha \leq 1$	$-0.12\alpha + 1.12$
0.02	$\alpha \leq -0.66$	0.95
	$-0.66 < \alpha \leq 0.32$	$0.36\alpha + 1.19$
	$0.32 < \alpha \leq 1$	$-0.26\alpha + 1.38$
0.01	$\alpha \leq -0.71$	1.15
	$-0.71 < \alpha \leq 0.37$	$0.34\alpha + 1.39$
	$0.37 < \alpha \leq 1$	$-0.38\alpha + 1.66$
0.005	$\alpha \leq -0.52$	1.48
	$-0.52 < \alpha \leq 0.24$	$0.26\alpha + 1.62$
	$0.24 < \alpha \leq 1$	$0.30\alpha + 1.75$
0.002	$\alpha \leq 0.27$	1.83
	$0.27 < \alpha \leq 1$	$-0.32\alpha + 1.92$
0.001	$\alpha \leq -0.10$	2.075
	$-0.10 < \alpha \leq 1$	$-0.27\alpha + 2.05$

A.1.4 Validación de la herramienta

Durante la construcción de una herramienta computacional es necesario realizar la validación de la programación realizada. Es decir, no se está validando los modelos como tal, sino determinando si el programa está arrojando resultados coherentes y apropiados para la simulación de gases más densos que el aire. El objetivo de esta sección es evidenciar la realización de dicha validación.

A.1.4.1 Modelo de Britter-McQuaid

Para validar la construcción de la herramienta que permite simular mediante el modelo de Britter-McQuaid se tomó un ejemplo de la referencia (Casal 2008). Allí se desea realizar la simulación en la que se tiene una emisión de propano licuado. Los datos del experimento se tienen a continuación (Tabla A. 3):

Tabla A. 3. Parámetros correspondientes a la emisión de propano licuado. Recuperado de (Casal 2008).

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico del líquido (m ³ /s)	0.065
Duración (s)	270
Velocidad del viento (m/s)	5.2
Densidad del propano líquido (kg/m ³)	553
Densidad del gas de propano en el punto de ebullición (-42°C) (kg/m ³)	2.32
Temperatura del aire del ambiente (°C)	20
Densidad del aire del ambiente (kg/m ³)	1.21

En el ejemplo desean encontrar la distancia segura al límite inferior de inflamabilidad (LFL=2.1% en volumen). Para determinar esta distancia, se calculó primero el flujo volumétrico de la emisión³⁹:

$$v_0 = \frac{0.065 \text{ m}^3/\text{s} \times 553 \text{ kg/m}^3}{2.32 \text{ kg/m}^3} = 15.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por otro lado, en este caso, la flotabilidad de la emisión inicial (gravedad corregida) está dada por (Ecuación 5.115):

$$g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2 \left(\frac{2.32 \text{ kg/m}^3 - 1.21 \text{ kg/m}^3}{1.21 \text{ kg/m}^3} \right) = 9 \text{ m/s}^2$$

En el ejemplo se realiza una corrección a la concentración de propano en la nube debido a condiciones no isotérmicas (Ecuación 5.125):

$$c = \frac{0.021}{0.021 + (1 - 0.021) \left(\frac{293}{231} \right)} = 0.017 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

³⁹ El flujo volumétrico se obtiene a partir del flujo másico, empleando el método presentado en el Anexo B, Ecuación B.7.

Por lo tanto, se desea calcular la distancia segura a una concentración de $0.017 \text{ m}^3/\text{m}^3$. El valor adimensional del eje x del nomograma de emisiones continuas (Figura 5.7) está dado por:

$$\left(\frac{g_0^2 v_0}{u^5}\right)^{1/5} = \left(\frac{9^2 \times 15.5}{5.2^5}\right)^{1/5} = 0.80$$

Y por lo tanto, a partir de la ecuación para el eje y del monograma de emisiones continuas (Figura 5.7):

$$\left(\frac{x}{(v_0/u)^{1/2}}\right) = \frac{x}{(15.5/5.2)^{1/2}} = \frac{x}{1.73}$$

Dado que $c_0=1$, $c/c_0=0.017$ y se obtiene que la distancia segura está dada por:

$$\frac{x}{1.73} = 197 \Rightarrow x = 340m$$

En la herramienta computacional diseñada se tiene un concepto diferente y es que se realiza una interpolación. Dado que las regresiones fueron realizadas para valores precisos de la relación de concentración, no se puede realizar el cálculo para un valor de $c/c_0=0.017$. Por lo tanto, se calcula la distancia segura a una concentración de $c/c_0=0.01$ y $c/c_0=0.02$ para después realizar una interpolación.

La interpolación es necesaria cuando el valor de concentración que se requiere está entre dos valores de los disponibles. Si X, la cantidad que se busca, es función de una sola variable independiente C, y la interpolación lineal es apropiada, entonces una proporción directa existe entre las diferencias correspondiendo a X y C. Cuando X, el valor en C, es intermedio entre dos valores dados, X_1 en C_1 y X_2 en C_2 , entonces (Smith 2005):

$$X = \left(\frac{C_2 - C}{C_2 - C_1}\right)X_1 + \left(\frac{C - C_1}{C_2 - C_1}\right)X_2 \quad \text{Ecuación A. 12}$$

De esta manera, se tiene que para $c/c_0=0.01$:

$$\frac{x_1}{1.73} = 251 \Rightarrow x_1 = 434m$$

Y para $c/c_0=0.02$:

$$\frac{x_2}{1.73} = 163 \Rightarrow x_2 = 282m$$

Realizando ahora una interpolación para calcular la distancia segura a una concentración de $c/c_0=0.017$, se obtiene:

$$x = \left(\frac{0.02 - 0.017}{0.02 - 0.01} \right) \times 434m + \left(\frac{0.017 - 0.01}{0.02 - 0.01} \right) \times 282m$$

$$x = 328m$$

De esta manera, se tienen los siguientes resultados (Tabla A. 4):

Tabla A. 4. Resultados obtenidos para la emisión de propano licuado.

Parámetro	Ejemplo tomado de (Casal 2008)	Herramienta computacional
Distancia segura a $c/c_0=0.017$	340 m	328 m

Calculando el porcentaje de error se obtiene:

$$\frac{|328 - 340|}{340} \times 100\% = 3.53\%$$

Por lo tanto, para el ejemplo desarrollado, se tiene un 3.53% de error concluyendo que tanto la herramienta como las regresiones utilizadas son válidas para el cálculo de la distancia segura siempre y cuando se utilice la interpolación de resultados.

A.1.4.2 Modelo SLAB

Para validar la construcción de la herramienta que permite simular mediante el modelo SLAB se tomaron dos ejemplos de la referencia (C. J. H. van den Bosch

2005). Dichos ejemplos son únicamente una aplicación de los modelos a casos de estudio contruidos por los autores.

El primer ejemplo trata de la evaporación de una piscina (pool) de cloro y el segundo de una emisión instantánea de propano.

A.1.4.2.1 Evaporación de una piscina de cloro

En este ejemplo se desea ilustrar la simulación cuando la fuente es la evaporación de una piscina de cloro, causado por la fuga de un tanque de almacenamiento. Los datos ingresados a la simulación se muestran en la Tabla A. 5.

Tabla A. 5. Parámetros de la evaporación de una piscina de cloro mediante SLAB.

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Emisión de una piscina (pool) evaporándose
Parámetro del subpaso numérico	NCALC = 1
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Cloro
Peso molecular del material de la fuente (kg)	WMS = 0.070906
Capacidad calorífica del vapor a presión constante (J/kg K)	CPS = 498.1
Temperatura del punto de ebullición (K)	TBP = 239.10
Fracción másica del líquido inicial	CMEDO = 1.0
Calor de vaporización (J/kg)	DHE = 287840
Capacidad calorífica del líquido (J/kg K)	CPSL = 962.35
Densidad del líquido del material de la fuente (kg/m ³)	RHOSL = 1574.0
Primera constante de la presión de saturación	SPB = 1978.34
Segunda constante de la presión de saturación (K)	SPC = -27.01
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	TS = 239.10
Flujo másico de la fuente (kg/s)	QS = 5.0
Área de la fuente (m ²)	AS = 100
Duración de la fuente continua (s)	TSD = 200
Masa de la fuente instantánea (kg)	QTIS = 0
Altura de la fuente (m)	HS = 0
Parámetros del Campo	
Tiempo para promediar la concentración (min)	TAV = 60
Distancia máxima en la dirección del viento (m)	XFFM = 1000
Alturas del cálculo de concentración (m)	ZP= 0
Parámetros Meteorológicos	
Altura de la rugosidad de la superficie (m)	ZO = 0.1
Altura de la medición del ambiente (m)	ZA = 10
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	UA = 5
Temperatura del ambiente (K)	TA = 288.15
Humedad relativa (%)	RH = 70
Valores de la clase de estabilidad	STAB = 4 (D)

En el ejemplo se construye un isocontorno de una concentración de cloro de 15 g/m^3 . Para calcular esta concentración en ppm se utiliza la Ecuación A. 13:

$$C(ppm) = \frac{22.4}{M} \left(\frac{T}{273} \right) \left(\frac{1}{P} \right) C(mg/m^3) \quad \text{Ecuación A. 13}$$

Donde $C(ppm)$ es la concentración en ppm, T es la temperatura en grados Kelvin, P es la presión absoluta en atm y M es el peso molecular en g/mol.

Por lo tanto, para el caso de estudio se tiene:

$$C(ppm) = \frac{22.4}{70.906 \text{ g/mol}} \left(\frac{239.1K}{273} \right) \left(\frac{1}{1atm} \right) 15000mg/m^3 = 4150ppm$$

Construyendo el isocontorno de una concentración de cloro de 4150 ppm se obtiene (Figura A. 6):

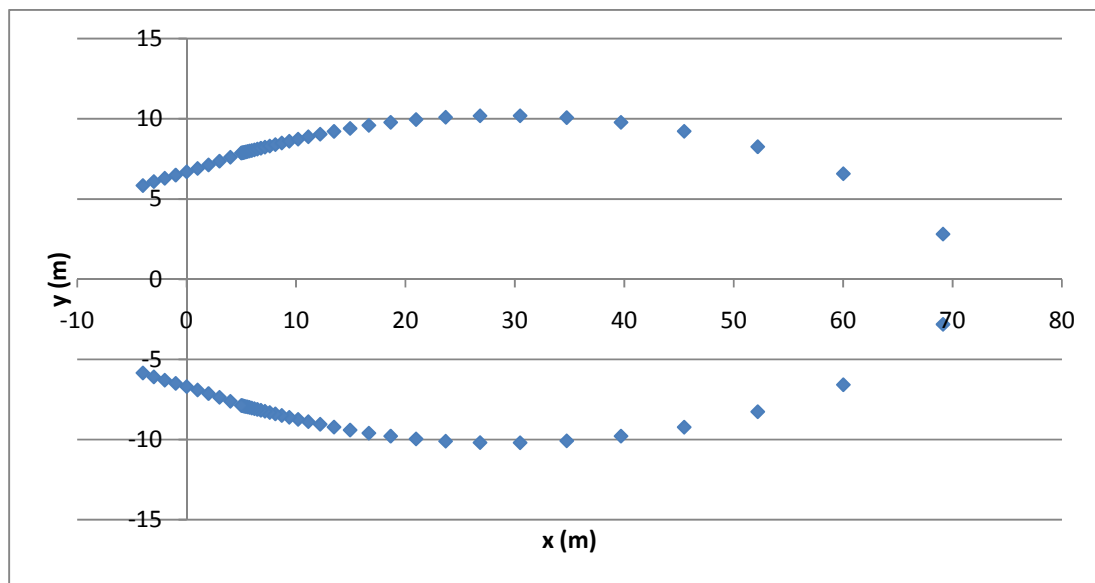


Figura A. 6. Isocontorno de concentración de cloro de 4150 ppm debido a una piscina evaporándose mediante SLAB.

Este ejemplo también fue utilizado para realizar una simulación utilizando el modelo de Britter-McQuaid, para ello primero se calcularon los parámetros necesarios (Tabla A. 6):

Tabla A. 6. Parámetros de la evaporación de una piscina de cloro mediante Britter-McQuaid.

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Emisión continua
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Cloro
Densidad característica del material de la fuente (kg/m ³)	RHO = 3.614
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	TS = 239.10
Flujo volumétrico de la fuente (m ³ /s)	QT = 1.38
Radio de la fuente (m)	R = 5
Parámetros Meteorológicos	
Densidad característica del aire del ambiente (kg/m ³)	RHOA = 1.22
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	UA = 5

Construyendo el isocontorno de una concentración de cloro de 4150 ppm se obtiene (Figura A. 7):

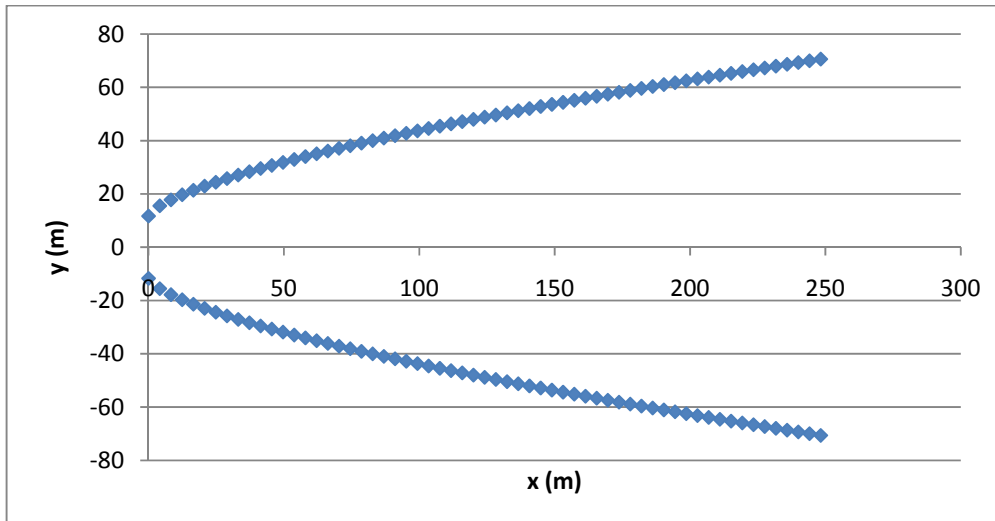


Figura A. 7. Isocontorno de concentración de cloro de 4150 ppm debido a una piscina evaporándose mediante Britter-McQuaid.

En el isocontorno obtenido por (C. J. H. van den Bosch 2005), se tiene que aproximadamente la distancia segura a una concentración de 4150 ppm es de 56 m y el ancho máximo de la nube es de 16 m. Es importante aclarar que por distancia segura se entiende la máxima distancia sobre el eje que alcanza la nube

con concentraciones por encima de 4150 ppm (la concentración seleccionada para la simulación). Dependiendo de la concentración seleccionada, ya sea un AEGL o el LFL, esta distancia corresponde a la mínima distancia al cual se dejan de percibir los efectos de la concentración, ya sean efectos sobre la salud o concentraciones que favorecen la explosividad o flamabilidad de la sustancia.

Por otro lado, en la simulación realizada con el modelo SLAB desarrollado, la distancia segura es de 69.1 m y el ancho máximo de la nube es de 20.4 m (Figura A. 6). Por último, por medio del modelo de Britter-McQuaid se obtuvo una distancia segura de 248.2 m mientras que dicha distancia segura en el ejemplo de van den Bosch, es de 210 m (Figura A. 7). Los resultados se resumen en la Tabla A. 7.

Tabla A. 7. Resultados obtenidos para la evaporación de una piscina de cloro.

Parámetro	Modelo SLAB		Modelo de Britter-McQuaid	
	Ejemplo tomado de (C. J. H. van den Bosch 2005)	Herramienta computacional	Ejemplo tomado de (C. J. H. van den Bosch 2005)	Herramienta computacional
Distancia segura (m)	56	69.1	210	248.2
Ancho máximo de la nube (m)	16	20.4	-	130

Como se puede observar de los resultados obtenidos, tanto para el modelo SLAB como para el modelo de Britter-McQuaid no existen diferencias mayores cuando se realizan comparaciones con el ejemplo ya realizado. Mediante estos resultados se puede concluir que para la simulación de la evaporación de una piscina (emisión continua) los programas construidos arrojan los resultados coherentes y apropiados.

A.1.4.2.2 Emisión instantánea de propano

El segundo caso de estudio que se trabajó fue el de una emisión instantánea de propano. En este caso la liberación forma una nube de gas de propano puro a condiciones ambientales. Los parámetros que se utilizaron en el modelo se muestran en la Tabla A. 8.

Tabla A. 8. Parámetros de una emisión instantánea de propano mediante SLAB.

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Instantáneo
Parámetro del subpaso numérico	NCALC = 1
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Propano
Peso molecular del material de la fuente (kg)	WMS = 0.044097
Capacidad calorífica del vapor a presión constante (J/kg K)	CPS = 1678
Temperatura del punto de ebullición (K)	TBP = 231.09
Fracción másica del líquido inicial	CMEDO = 0.0
Calor de vaporización (J/kg)	DHE = 425740
Capacidad calorífica del líquido (J/kg K)	CPSL = 2520
Densidad del líquido del material de la fuente (kg/m ³)	RHOSL = 500.5
Primera constante de la presión de saturación	SPB = 1872.46
Segunda constante de la presión de saturación (K)	SPC = -25.16
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	TS = 231.09
Flujo másico de la fuente (kg/s)	QS = 0
Área de la fuente (m ²)	AS = 652.8
Duración de la fuente continua (s)	TSD = 0
Masa de la fuente instantánea (kg)	QTIS = 14600
Altura de la fuente (m)	HS = 0
Parámetros del Campo	
Tiempo para promediar la concentración (s)	TAV = 3600
Distancia máxima en la dirección del viento (m)	XFFM = 10000
Alturas del cálculo de concentración (m)	ZP= 0
Parámetros Meteorológicos	
Altura de la rugosidad de la superficie (m)	ZO = 0.03
Altura de la medición del ambiente (m)	ZA = 10
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	UA = 4
Temperatura del ambiente (K)	TA = 288.15
Humedad relativa (%)	RH = 0.7
Valores de la clase de estabilidad	STAB = 6 (F)

En el ejemplo se construye un isocontorno de una concentración de propano de 9.3 g/m^3 a los 240 s de la emisión. Para calcular esta concentración (Ecuación A. 13) en ppm se tiene:

$$\frac{22.4}{44.097} \left(\frac{231.09}{273} \right) 9300 \text{ mg/m}^3 = 3999 \text{ ppm}$$

Construyendo el isocontorno de una concentración de propano de 3999 ppm a los 240 s de la emisión se obtiene (Figura A. 8):

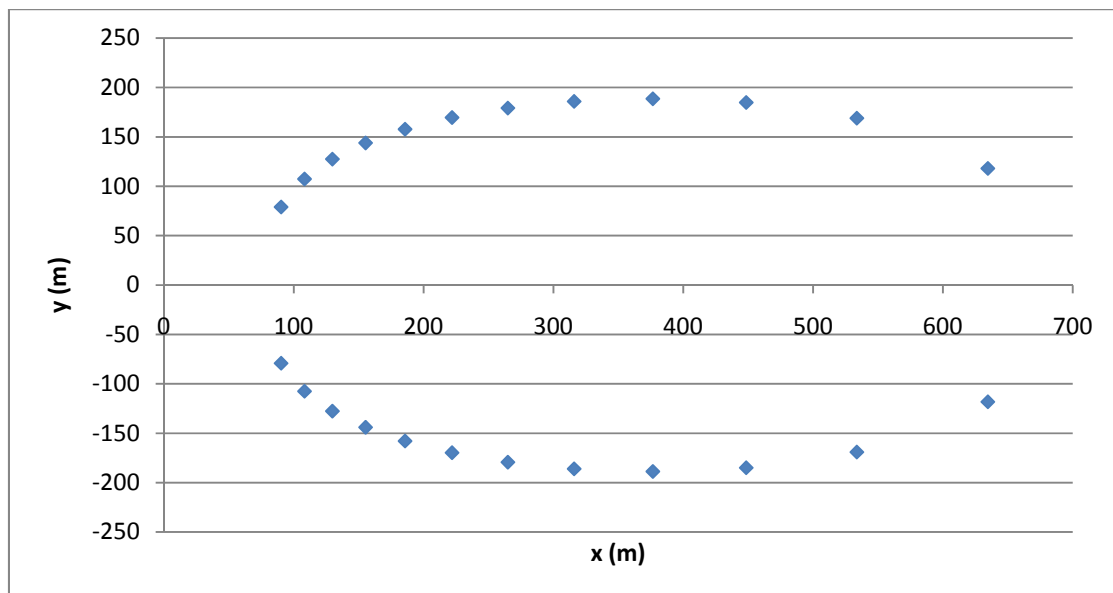


Figura A. 8. Isocontorno de concentración de propano de 3999 ppm a los 240 s debido a una emisión instantánea mediante SLAB.

Sin embargo, la extensión máxima que alcanza el isocontorno de 3999 ppm se da a los 452 s. Construyendo dicho isocontorno se obtiene (Figura A. 9):

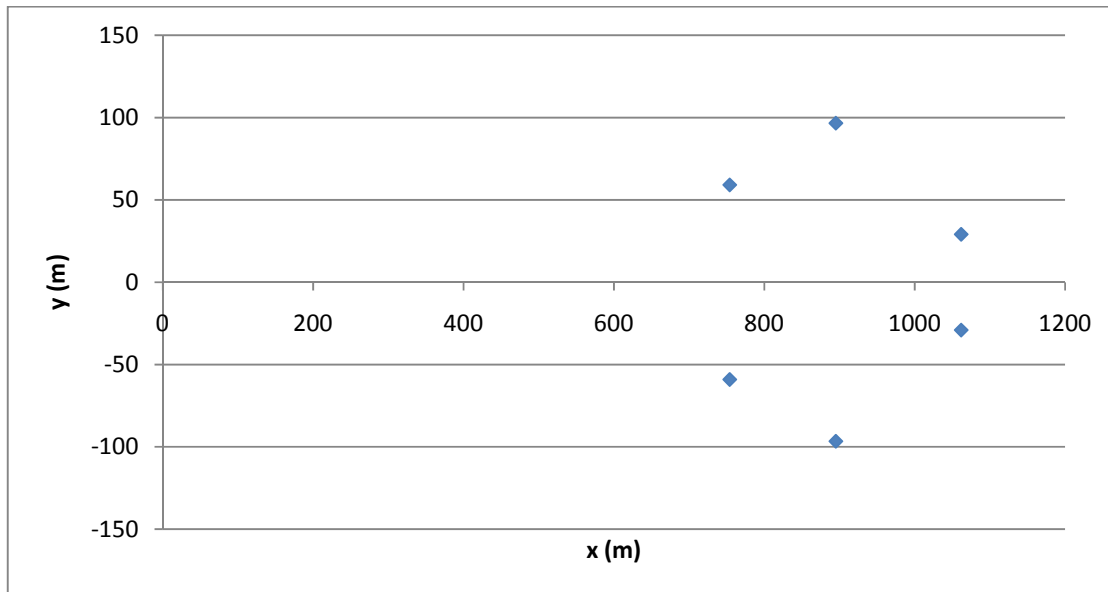


Figura A. 9. Isocontorno de concentración de propano de 3999 ppm a los 452 s debido a una

 emisión instantánea mediante SLAB.

Como se puede observar en la Figura A. 8, a los 240 s la nube alcanza una

 distancia de 634.6 m y tiene un ancho máximo de 377.3 m. Sin embargo, a los

 452 s la nube se ha diluido y avanzado en la dirección del viento, por lo que

 alcanza una distancia de 1061.7 m y tiene un ancho máximo de 193.2 m, como se

 observa en la Figura A. 9. Para realizar la simulación utilizando el modelo de

 Britter-McQuaid se calcularon primero los parámetros necesarios (Tabla A. 9):

Tabla A. 9. Parámetros de una emisión instantánea de propano mediante Britter-McQuaid.

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Emisión instantánea
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Propano
Densidad característica del material de la fuente (kg/m^3)	$\text{RHO} = 2.33$
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	$\text{TS} = 231.09$
Volumen de la fuente (m^3)	$\text{Q} = 6278$
Radio de la fuente (m)	$\text{R} = 12.77$
Parámetros Meteorológicos	
Densidad característica del aire del ambiente (kg/m^3)	$\text{RHOA} = 1.22$
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	$\text{UA} = 4$

Con el fin de realizar una comparación apropiada se construyó el isocontorno de una concentración de 3999 ppm 240 s después de la emisión. Los resultados se muestran en la Figura A. 10:

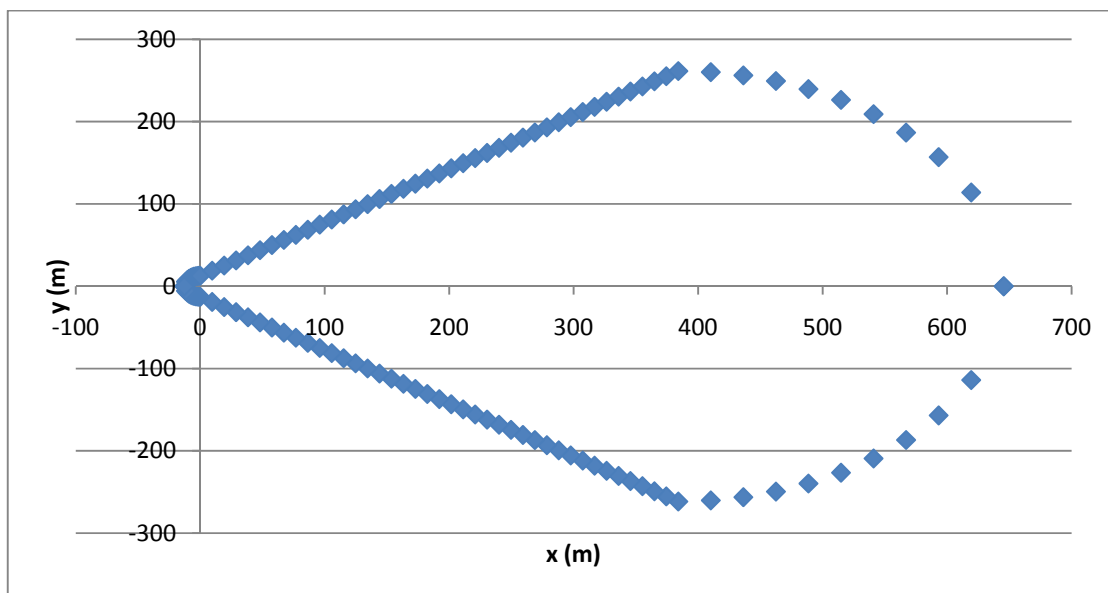


Figura A. 10. Isocontorno de concentración de propano de 3999 ppm a los 240 s debido a una emisión instantánea mediante Britter-McQuaid.

En este instante de tiempo, la distancia segura es de 645.4 m y el ancho máximo alcanzado por la nube es de 522.8 m. Sin embargo, la distancia segura máxima es de 1333 m y el tiempo de llegada de la nube a esa distancia es de 580 s, como se observa en la Figura A. 11, la cual presenta la construcción del isocontorno de una concentración de 3999 ppm a estos 580 s después de la emisión. En este caso se habla de distancia segura máxima puesto que, de acuerdo a las concentraciones evaluadas, este corresponde al mayor valor de separación desde el epicentro de la emisión para los tiempos evaluados. No obstante, es fundamental tener en cuenta que el valor de la distancia segura depende del grado de afectación (representado en valores de concentración) que se desee evaluar.

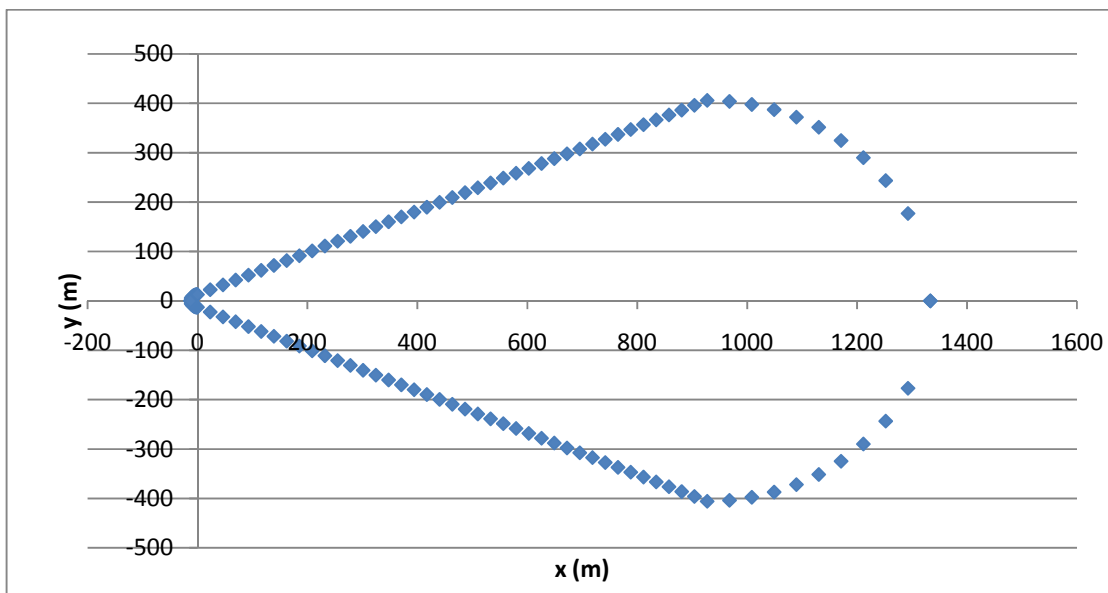


Figura A. 11. Isocontorno de concentración de propano de 3999 ppm a los 580 s debido a una emisión instantánea mediante Britter-McQuaid.

En el isocontorno obtenido en el ejemplo se puede observar de C. J. H. van den Bosch (2005) que aproximadamente la distancia segura a una concentración de 3999 ppm 240 s después de la emisión es de 650 m y el ancho máximo de la nube es de 360 m para el modelo SLAB; con la herramienta computacional se obtuvieron 634.6 m de distancia segura y 377.6 s de de ancho máximo de la nube con este modelo. Por otro lado, en el ejemplo de van den Bosch (2005) se obtiene que la distancia máxima alcanzada por la nube es de 913 m a los 410 s de la emisión. Los resultados se resumen en la Tabla A. 10.

Tabla A. 10. Resultados obtenidos para una emisión instantánea de propano.

Tiempo (s)	Parámetro	Modelo SLAB		Modelo de Britter-McQuaid	
		Ejemplo tomado de (C. J. H. van den Bosch 2005)	Herramienta computacional	Ejemplo tomado de (C. J. H. van den Bosch 2005)	Herramienta computacional
240	Distancia segura (m)	650	634.6	-	645.4
	Ancho máximo de la nube (m)	360	377.6	-	522.8
Máximo alcanzado	Distancia segura (m)	913 (410 s después)	1061.7 (452 s después)	-	1333 (580 s después)
	Ancho máximo de la nube (m)	-	193.2	-	811.9

En un tiempo de 240 s, las diferencias obtenidas entre la herramienta computacional y el ejemplo para la distancia segura y el ancho máximo de la nube son mínimas. Incluso la distancia segura en ese instante de tiempo obtenida mediante el modelo de Britter-McQuaid es muy similar a los dos anteriores. Por otro lado, el tiempo máximo en el que se tiene rastros de la nube usando SLAB se encontró que es 452 s, mientras que en el ejemplo se obtiene 410 s. El porcentaje de error de la distancia máxima alcanzada por la nube es de 16.3% mostrando que para emisiones instantáneas los programas desarrollados arrojan buenos resultados al ser comparados con resultados existentes.

A.1.5 Manual SiDiG

El módulo de simulación SiDiG permite estudiar, bajo la construcción de escenarios, la dispersión de gases más densos que el aire en la ciudad de Bogotá.

Prerrequisitos:

Sistema Operativo: Windows XP o Windows 7
 Última versión de JAVA (Versión 6, actualización 22) instalada, disponible en <http://www.java.com>

A.1.5.1 Introducción -Descripción General

SiDiG es una herramienta para la simulación de dispersión de gases tóxicos más densos que el aire por ocurrencia de accidentes industriales. Su desarrollo se promueve bajo un convenio de cooperación de ciencia y tecnología entre el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá [FOPAE] y la Universidad de los Andes. SiDiG, está adaptado a las condiciones del Distrito Capital y su uso se suscita como instrumento de soporte para la toma de decisión.

SiDiG se desarrolla como un software de libre distribución en JAVA, está soportado en dos modelos de dispersión de gases más densos que el aire [SLAB y Britter-McQuaid] y se caracteriza por tener cortos tiempos de simulación [inferiores a 10 minutos] de escenarios cuyas fuentes de emisión sean continuas o instantáneas.

A través de sus resultados es posible estimar áreas de influencia asociadas a concentraciones de exposición aguda, distancias seguras y anchos de nube. La visualización de resultados está conectada a Google Maps, situación que posibilita el uso de SiDiG y la visualización de resultados en cualquier lugar, aunado al hecho de estar disponible en dos idiomas: español e inglés. Así mismo, los resultados pueden ser exportados como archivos de texto con el fin de estar disponibles para su uso en otro tipo de aplicaciones.

A.1.5.2 Objetivos del Programa

Calcular distancias seguras para la exposición a una sustancia tóxica, que en estado gaseoso, tenga una densidad superior a la del aire. Dicho cálculo se genera a partir de concentraciones de interés para sustancias particulares y que generan contornos de isoconcentraciones.

A.1.5.3 Instalación y ejecución del Programa

- Descomprima el archivo FOPAE.zip en el lugar que desee
- Haga doble-clic sobre el archivo SiDiG.jar

A.1.5.4 Pasos básicos para la utilización de un modelo de dispersión de gases más densos que el aire

Seleccione la opción nuevo modelo:

Esto se puede realizar de dos formas:

- En el menú superior seleccione archivo y elija la opción Nuevo Modelo (Figura A. 12).

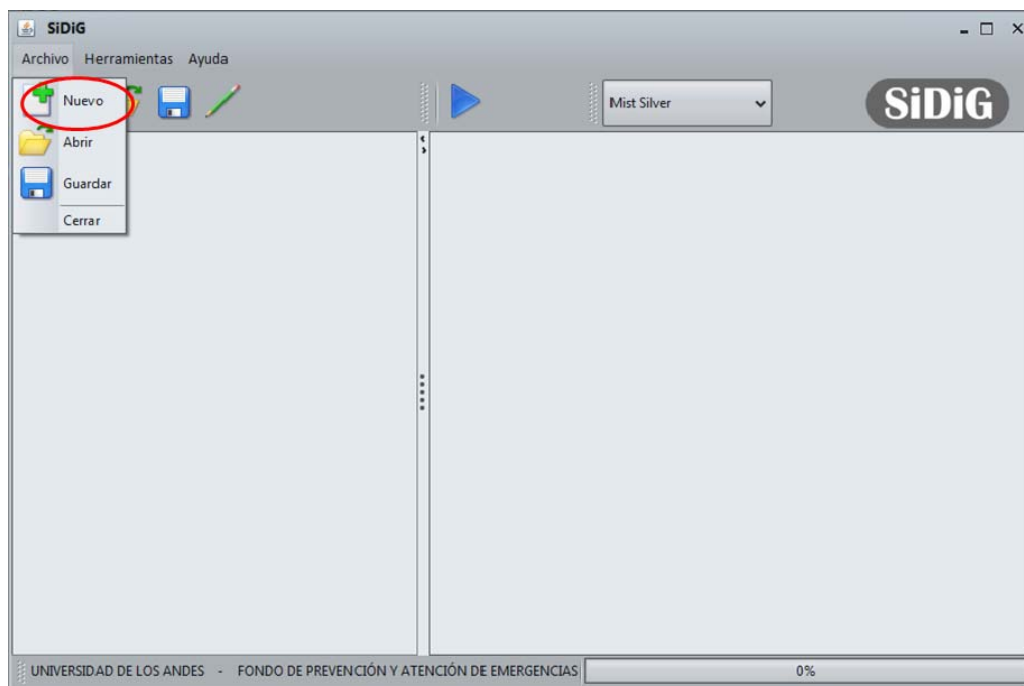


Figura A. 12. Interfaz del usuario para la selección de un nuevo archivo de simulación.

b) Haga clic sobre el botón Nuevo Modelo en la barra de herramientas (Figura A. 13)

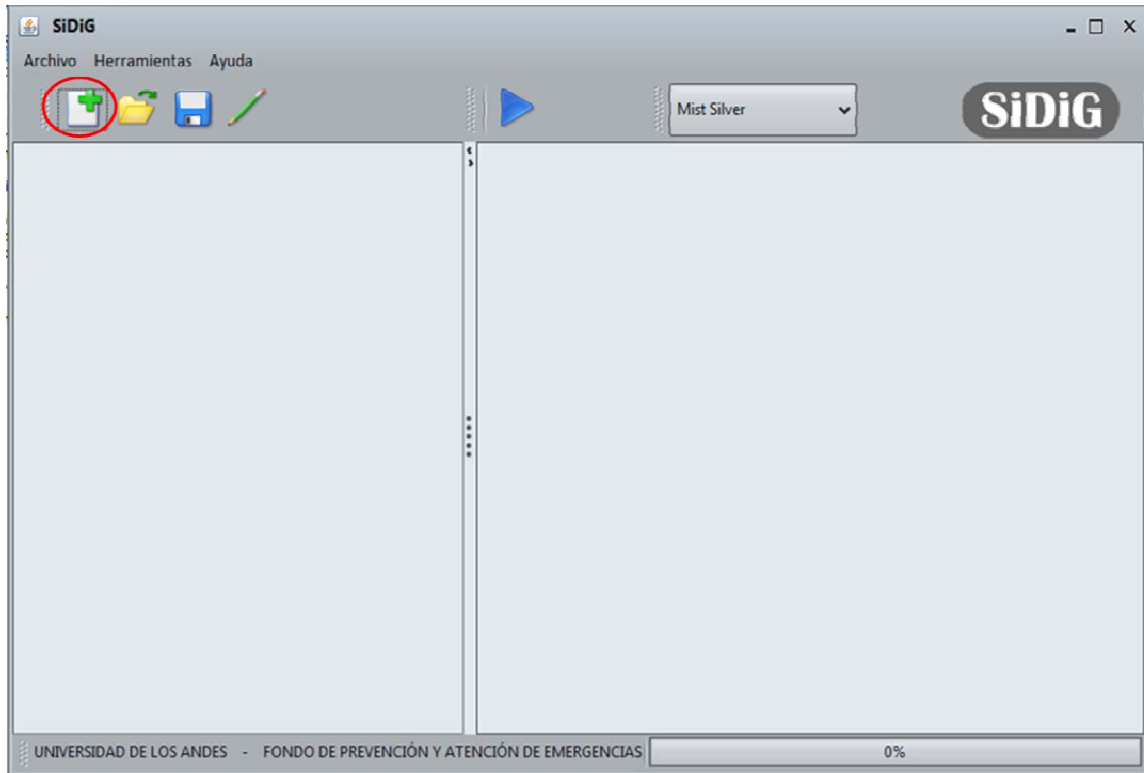


Figura A. 13. Interfaz del usuario para la selección de un nuevo archivo de simulación.

A.1.5.5 Elección del modelo a utilizar

Al crear un nuevo modelo aparecerá un diálogo para elegir el modelo que desea utilizar como el presentado a continuación en el que se enlistan los modelos disponibles para la dispersión de gases más densos que el aire:

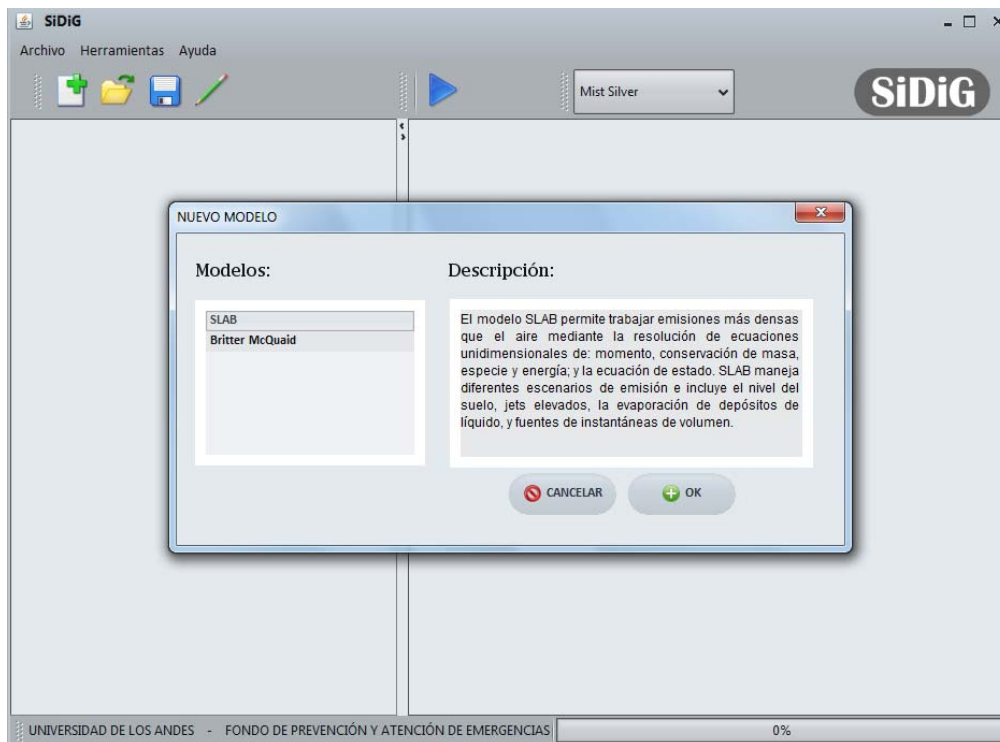


Figura A. 14. Ventana de dialogo en el programa SiDiG para la selección del modelo de interés.

Modelos Disponibles

A.1.5.5.1 SLAB

Este es el modelo más completo que ofrece el programa para simular la dispersión de gases más densos que el aire. Para ver la descripción detallada de este haga clic sobre SLAB en la lista de la izquierda.

Si desea utilizar este modelo elija la opción SLAB en la lista que aparece a la izquierda y haga clic en el botón OK.

La selección de los valores empleados para la simulación debe seguir la guía presentada en el capítulo 7. El valor de la distancia máxima en la dirección del viento, debe ser seleccionado de acuerdo a las necesidades del usuario, teniendo en cuenta que este parámetro proporciona la máxima distancia en la dirección del viento para la cual realizará el cálculo del perfil de concentración.

A.1.5.5.2 Britter-McQuaid

Este es un modelo más simple que SLAB. Si es la primera vez que utiliza el programa se recomienda utilizar este modelo, ya que este no requiere de tantos datos de entrada (parámetros) como el modelo SLAB. Para ver la descripción detallada de este haga clic sobre Britter-McQuaid en la lista de la izquierda.

Si desea utilizar este modelo elija la opción Britter-McQuaid en la lista que aparece a la izquierda y haga clic en el botón OK.

Al igual que para el modelo SLAB, en el capítulo 7 se realiza la descripción de los parámetros a emplear en este modelo.

A.1.5.6 Ingreso de Parámetros

A.1.5.6.1 Indicaciones Generales

Al elegir un modelo se abre el diálogo para ingresar los parámetros respectivos. Estos están divididos en distintas secciones. En la parte de la izquierda del diálogo se encuentra un árbol, el cuál contiene el resumen de todos los parámetros organizados por secciones (las cuales están con letra negrilla). En la parte de la derecha se ingresan los datos y se navega entre las diferentes secciones. A continuación se explicarán estas partes del diálogo.

a) Árbol (Resumen de los parámetros):

En este árbol se puede ver el avance en el ingreso de datos. Para esto los parámetros en el árbol tienen asociado un ícono el cual puede tomar 3 valores distintos:

1. Un ícono de “visto bueno” que indica que ya se ingresó el valor del parámetro y que este es correcto

Ejemplo:

✓ Tipo de derrame - Emisión de un jet vertical

2. Un ícono de advertencia que indica que el valor del parámetro no se ha ingresado o que el valor del parámetro no es válido.

Ejemplo:

⚠ Peso molecular del material de la fuente

3. Un menos el cual indica que no es necesario ingresar el valor de este parámetro. Este símbolo aparece únicamente en la parte derecha cuando se están ingresando los valores, en la parte izquierda este se muestra como el ícono de "visto bueno".

Ejemplo:

Inverso de la longitud Monin-Obukhov

1/m

✓ Inverso de la longitud Monin-Obukhov

Adicionalmente el formato de presentación del parámetro en el árbol muestra el nombre del parámetro y su valor actual. Este sólo se muestra si el valor del parámetro es válido:

Ejemplo:

✓ Parámetro del subpaso numérico - 1

b) Ingreso de los parámetros

En la parte de la derecha del diálogo se ingresan los datos. A continuación se describe los tipos de parámetros que hay:

➤ Parámetro Valor:

Este tipo de parámetro es en el cual el usuario deberá escribir directamente un valor.

Ejemplo:

Temperatura del material de la fuente	600	✓ K
---------------------------------------	-----	-----


Como podemos ver en el ejemplo, a la izquierda se encuentra el nombre del parámetro, después la casilla donde se debe ingresar su valor y por último las unidades del parámetro, en este caso K (Kelvin). En el momento que el que el usuario se encuentra escribiendo el valor del parámetro, se va validando su valor y el árbol a la izquierda se va actualizando.

➤ Parámetro Lista

En este tipo de parámetro el usuario deberá elegir entre las opciones que se presentan en una lista.

Ejemplo:

Tipo de derrame




- Emisión de una piscina (pool) evaporándose
- Emisión de un jet horizontal
- Emisión de un jet vertical
- Instantáneo o emisión de una piscina (pool) evaporándose

Al elegir una de las opciones el árbol a la izquierda se actualiza automáticamente.

➤ **Parámetro Combo**

Al igual que el parámetro lista, el usuario elige una de las opciones disponibles. La diferencia es la forma en el que estas están presentadas. Haciendo clic sobre el círculo rojo que se muestra en el ejemplo se despliega la lista con las opciones disponibles.

Ejemplo:


Valores de la clase de estabilidad 

Al igual que los otros dos parámetros, al elegir la opción que desee el usuario el árbol a la izquierda del diálogo se actualiza automáticamente.

c) **Descripción y consejos de los parámetros.**

En la parte inferior de todas las secciones se encuentra un recuadro con el título "Consejos". En este recuadro se muestra la descripción general de los parámetros y algunos consejos acerca de los valores que pueden tomar los parámetros. Al seleccionar un parámetro, el recuadro muestra la información correspondiente.

Ejemplo:

Inverso de la longitud Monin-Obukhov  1/m

Consejo

La longitud de Monin-Obukhov es un parámetro de estabilidad utilizado en la teoría de similitud para describir el perfil vertical de la velocidad del viento del ambiente y la difusividad turbulenta vertical.

d) Navegación entre las diferentes secciones


Existen dos formas de navegar entre las diferentes secciones.

- Utilizando los botones que se encuentran en la parte inferior (Figura A. 15):
 - Botón siguiente: Al hacer clic se dirige a la siguiente sección.
 - Botón anterior: Al hacer clic se dirige a la anterior sección.



Figura A. 15. Botones anterior y siguiente empleados para la navegar en las diferentes secciones del programa.

2. Seleccionar la sección en la parte superior.



The screenshot shows a software interface with a navigation bar at the top containing five tabs: "TIPO DE FUENTE", "PROPIEDADES DE LA FUENTE", "PARÁMETROS DEL DERRAME", "PARÁMETROS DEL CAMPO", and "PA...". The "PROPIEDADES DE LA FUENTE" tab is highlighted with a red circle. Below the tabs, the main content area is titled "Tipo de derrame" and features an illustration of a truck with a vertical jet of steam. To the right of the illustration are four radio button options: "Emisión de una piscina (pool) evaporándose", "Emisión de un jet horizontal", "Emisión de un jet vertical" (which is selected), and "Instantáneo o emisión de una piscina (pool) evaporándose d...". Below these options is a numerical input field labeled "Parámetro del subpaso numérico" containing the value "1", with a green checkmark and the word "decimal" to its right. At the bottom of the interface is a "Consejo" section with an empty text box, and a row of four buttons: "VALIDAR", "ANTERIOR", "SIGUIENTE", and "OK".

Figura A. 16. Pestañas de navegación en las diferentes secciones del programa.

A continuación se presenta una descripción general de los parámetros utilizados en los modelos SLAB y Britter-McQuaid.

Después de ingresar todos los parámetros completos haga clic sobre el botón OK.

A.1.5.7 Ejecución y visualización de los resultados

A.1.5.7.1 Ejecución

Al ingresar todos los datos, y hacer clic sobre el botón OK se muestra la siguiente pantalla:

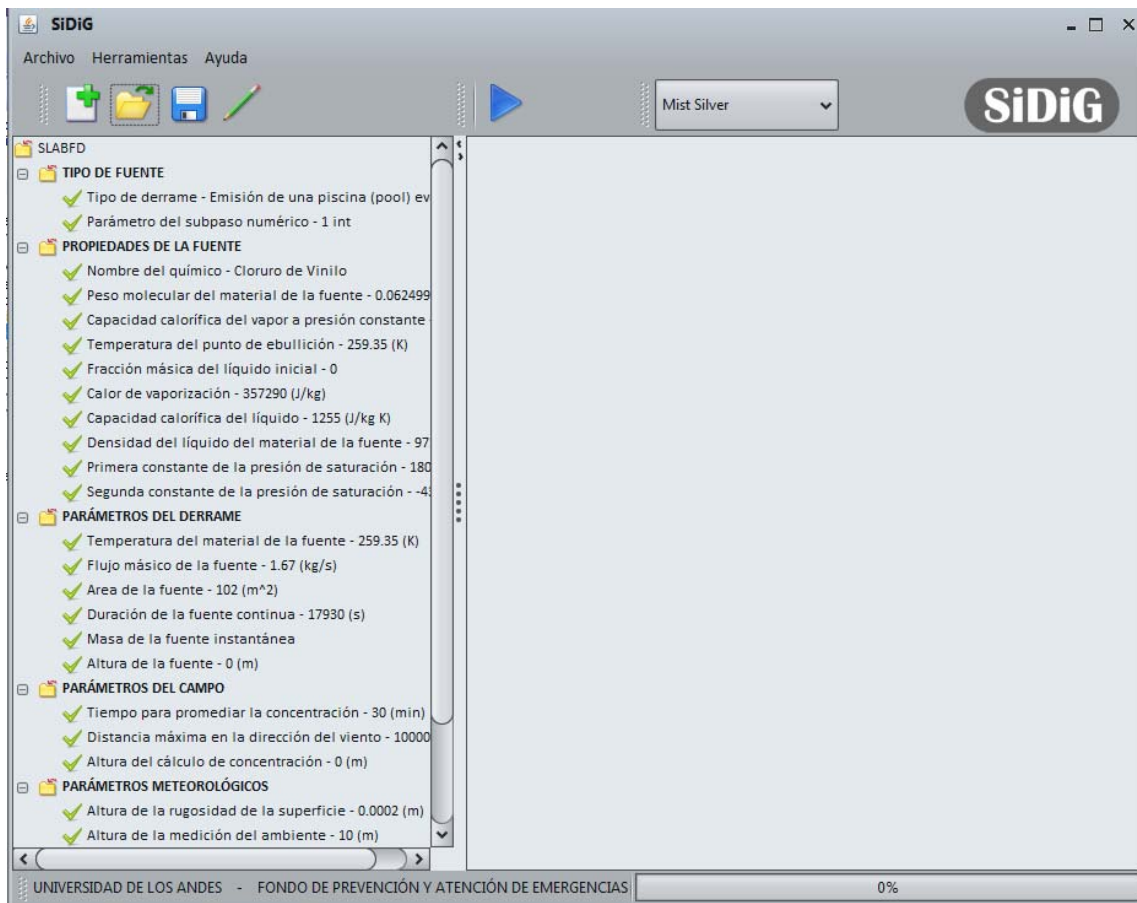


Figura A. 17. Ventana de dialogo después de completar todos los parámetros.

A la izquierda se puede apreciar el mismo árbol que en el diálogo de ingreso de datos con el resumen de todos los parámetros ingresados.

a) Haga clic sobre el triángulo azul:



A.1.5.7.2 Opciones para la visualización de resultados

Después de correr el modelo se abren los resultados obtenidos:

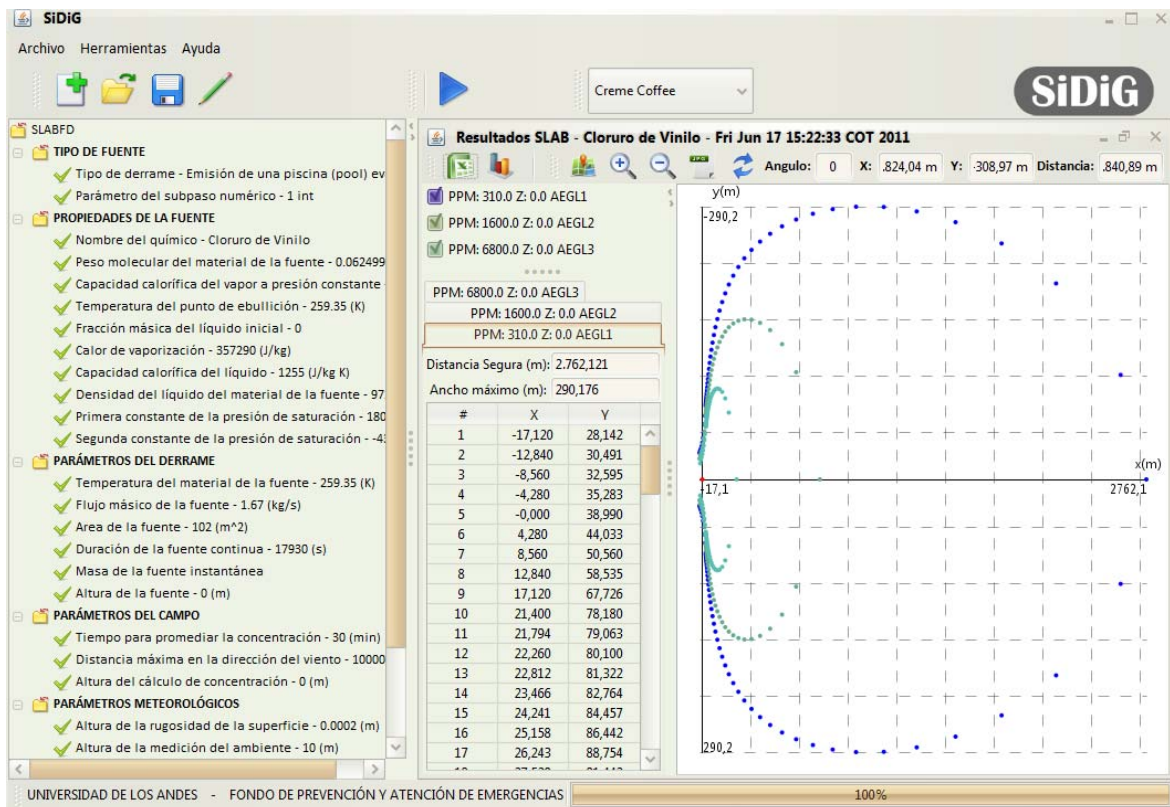


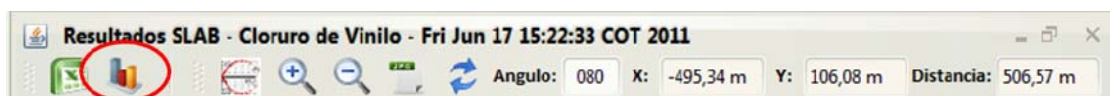
Figura A. 18. Pantalla de visualización de resultados.

Por default el programa arroja tres isocontornos a una determinada altura y de acuerdo a las concentraciones de los AEGLs. La visualización de las isocontornos incluye la tabla con las diferentes coordenadas (X, Y) y adicionalmente se

muestra la gráfica correspondiente. A continuación se presentarán las diferentes opciones de la barra de herramientas de los resultados.

a) Creación de un nuevo isocontorno

Haga clic sobre el botón crear nuevo isocontorno el cuál se muestra a continuación resaltado con rojo:



Al hacer clic sobre el botón crear nuevo isocontorno se mostrará una ventana como la que se ilustra a continuación:

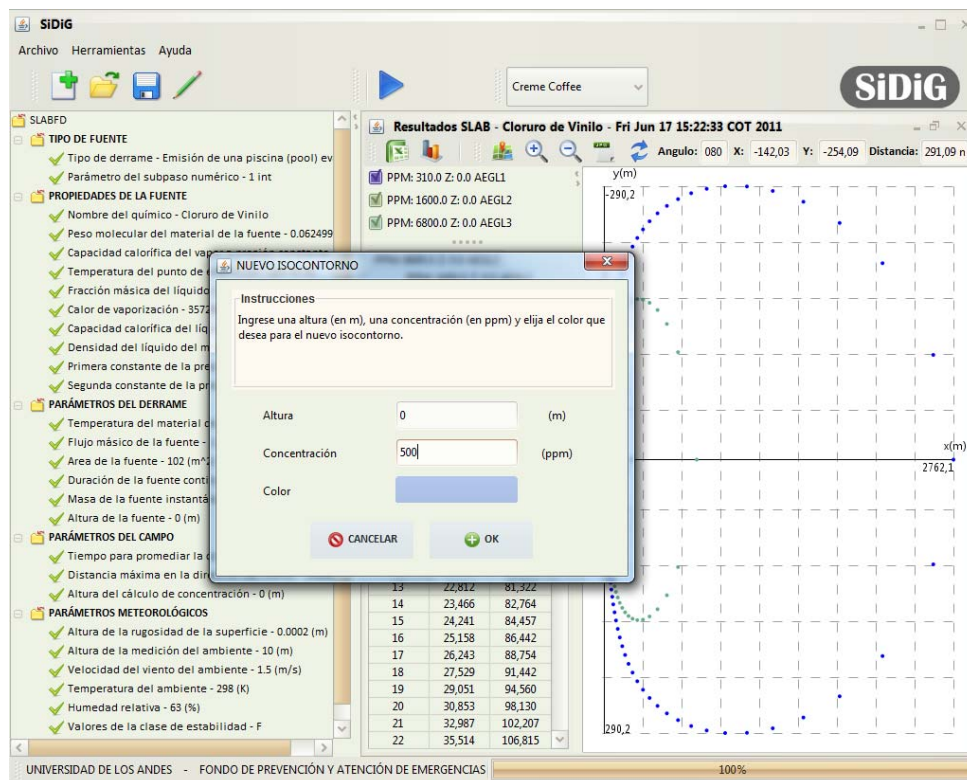


Figura A. 19. Ventana para la creación de un nuevo isocontorno.

Elija una altura y una concentración y un color para el nuevo isocontorno y haga clic en el botón OK.

Opciones de la visualización del isocontorno

Las opciones de la visualización del isocontorno están en la parte de la derecha de la barra de herramientas.

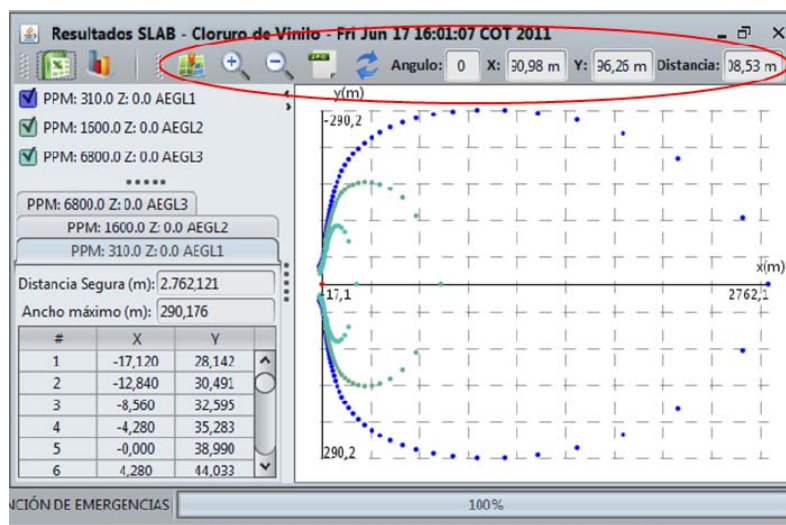


Figura A. 20. Opciones de visualización del isocontorno.

Las opciones son las siguientes:

1. Google Maps

Permite ubicar los perfiles de dispersión en Google Maps



2. Zoom In

Agranda el tamaño de la gráfica



3. Zoom Out

Disminuye el tamaño de la gráfica



4. Exportar gráfica

Exporta la gráfica a un archivo .jpg



5. Angulo



6. En la parte de la derecha se pueden ver las coordenadas del mouse cuando este se encuentra sobre la gráfica, y la distancia desde el origen:

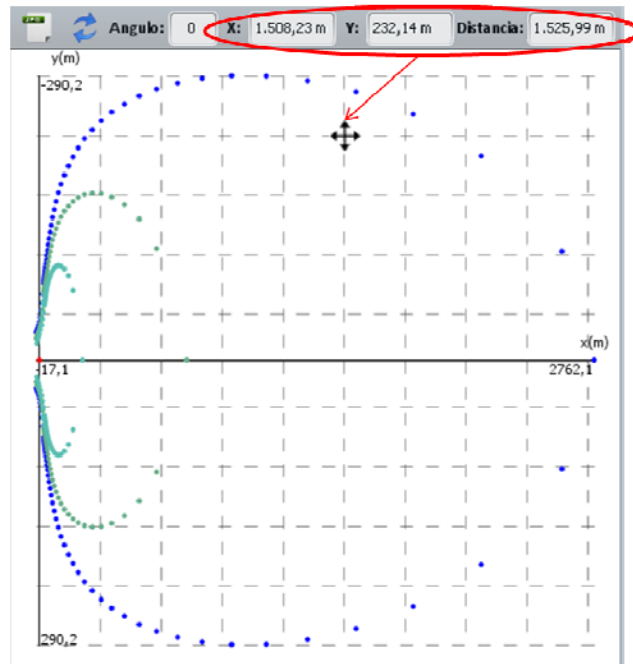


Figura A. 21. Coordenadas de ubicación del cursor en la gráfica.

b) Exportar resultados

Haga clic sobre el botón que se muestra a continuación:



Se mostrará el diálogo que se presenta a continuación en la Figura A. 22, en el cual deberá elegir los isocontornos que desea exportar en formato .txt.



Figura A. 22. Cuadro de diálogo para la selección de los isocontornos de interés.

A la derecha se muestran los isocontornos que se van a exportar y a la izquierda los disponibles. Cuando termine de elegir los isocontornos que desea exportar haga clic sobre el botón EXPORTAR.

A.1.5.8 Configuraciones generales del programa

A.1.5.8.1 Configuración de idioma

Para cambiar el idioma haga clic sobre "Herramientas" del menú principal, cambiar idioma y elija el idioma que desea.

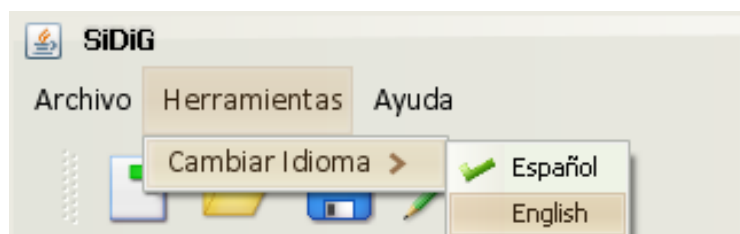


Figura A. 23. Selección de idioma en el programa SiDiG.

A.1.5.8.2 Configuración la apariencia "Look and Feel"

Para cambiar la apariencia haga clic dónde muestra el recuadro rojo en la Figura A. 24, a continuación se despliega la lista de temas Figura A. 25, elija la apariencia que desee.

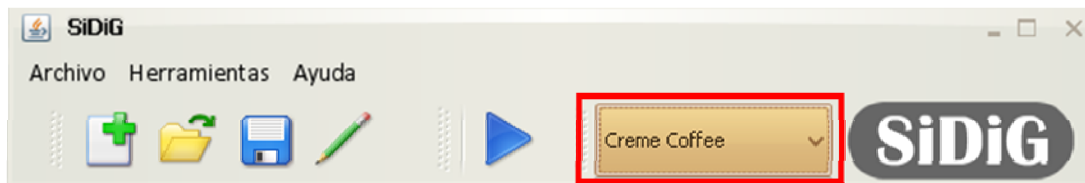


Figura A. 24. Icono para la selección de la apariencia del programa.

Ejemplo:

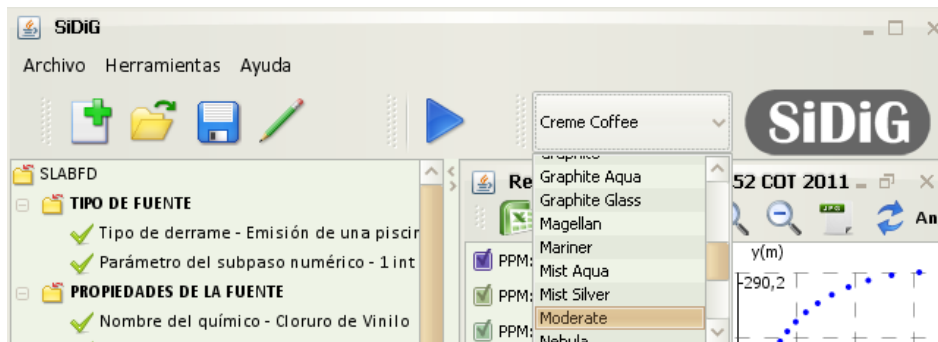


Figura A. 25. Lista desplegable de temas de apariencia en el SiDiG.

Nueva apariencia:

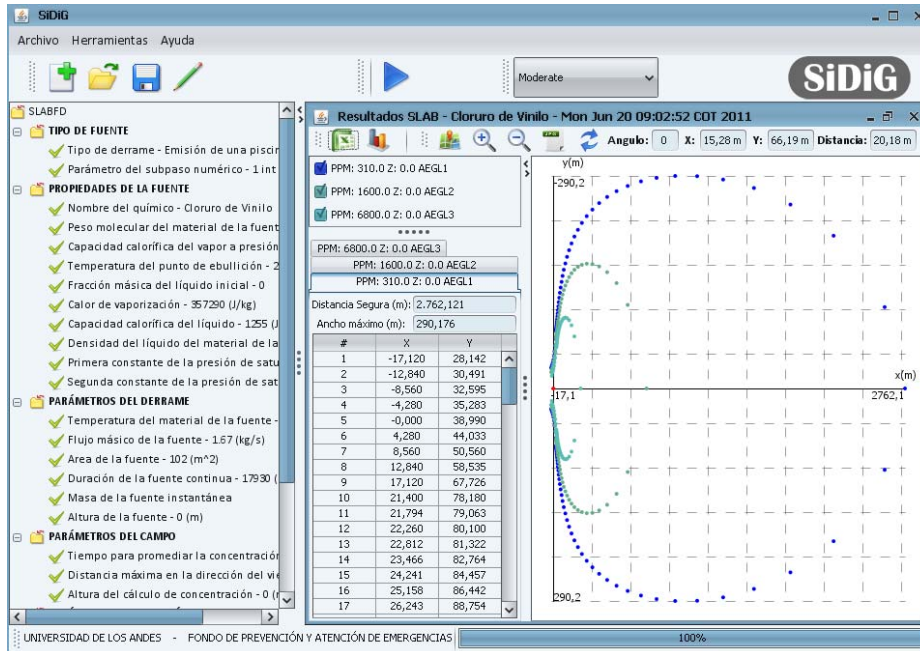


Figura A. 26. Nueva apariencia del SiDiG.

A.2. Herramienta de visualización geográfica SIG

Para complementar la herramienta de simulación se construyó una herramienta para la visualización de resultados en ArcGIS sobre la cartografía del Distrito asociada a población e infraestructura sensible.

El componente SIG hace parte del “Modelo del cálculo de zonas afectadas por niveles de concentración por una explosión química en la Ciudad de Bogotá”. La herramienta desarrollada bajo ArcObjects para ArcGIS 9.3.1 y ArcGIS 10 genera un mapa que presenta la información geográfica de población, áreas de interés público y ambiental, afectados por niveles de concentración química causados por una explosión. Esta herramienta realiza un cálculo a la vez y utiliza los insumos y capas geográficas suministrados por la FOPAE.

Prerrequisitos:

- Sistema Operativo: Windows XP, Windows Vista o Windows 7
- Licencia de ArcGIS 9.3.1 instalado ó licencia de ArcGIS 10
- Configuración regional del idioma sea español–Colombia.
Esa configuración permite reconocer los archivos de entrada que tengan decimales separados por comas.
- El usuario sea conocedor del manejo de ArcGIS

A.2.1 Instalación de la herramienta

El aplicativo cuenta con los instaladores para la versión ArcGIS 10 y ArcGIS 9.3. Los cuales se encuentran en la carpeta:

:ModeloSIG_Explosion_Quimica\Instaladores

Versión 10: AddinModeloZonas.esriAddIn

Versión 9.3: SetupModelo.msi

A.2.1.1 Versión 9.3.1

Se entrega un instalador con nombre **SetupModelo.msi** que al ejecutarlo muestra la siguiente ventana:



Figura A. 27. Ventana de dialogo del instalador del aplicativo Modelo Zonas en la versión 9.3.1.

1. Indica al usuario en donde debe ser guardada la herramienta y si es para todos los usuarios o para el usuario que está instalando.

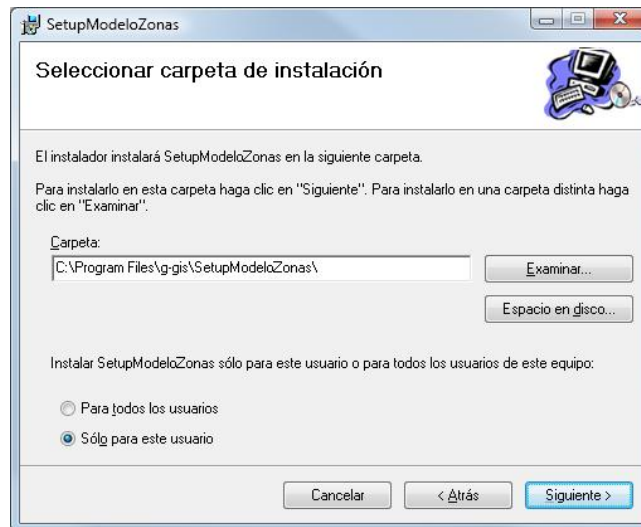


Figura A. 28. Selección de la carpeta de instalación del aplicativo Modelo Zonas en la versión 9.3.1.

2. Con el botón siguiente la herramienta ModeloZonas comienza a ser instalada.

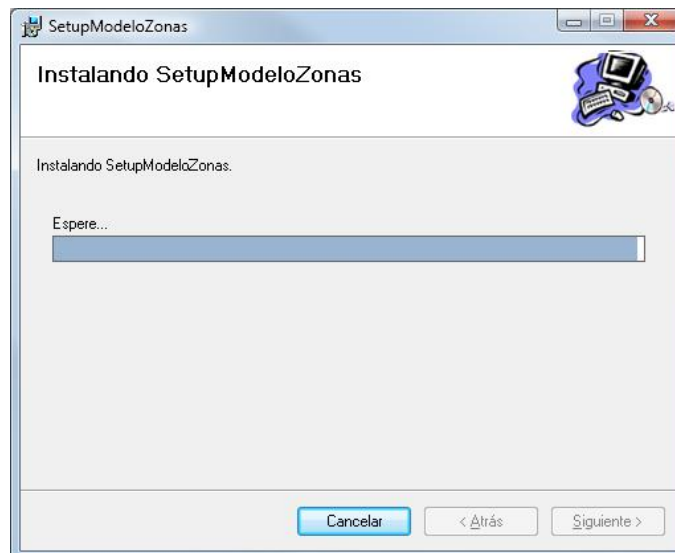


Figura A. 29. Instalación del aplicativo Modelo Zonas en la versión 9.3.1.

- Una vez completada la instalación aparece una ventana que indica que la instalación ha sido completada.

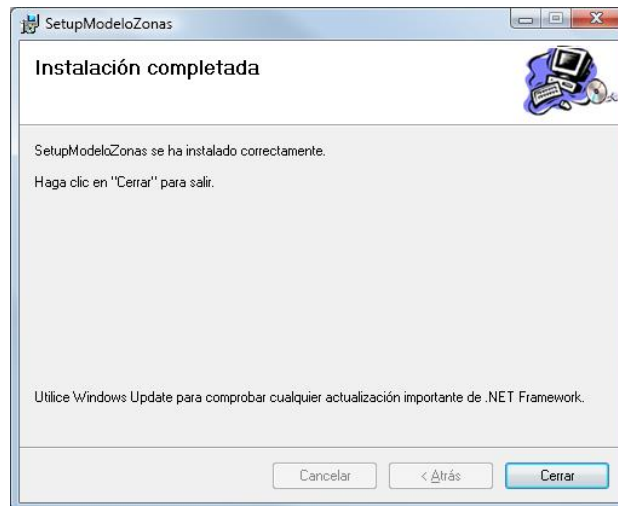


Figura A. 30. Aviso de instalación completa del aplicativo Modelo Zonas en la versión 9.3.1.

- Para desinstalar la herramienta se selecciona en Panel de Control, Programas, Programas y Características y se luego se busca el programa ModeloZonas y se oprime el botón de desinstalar.

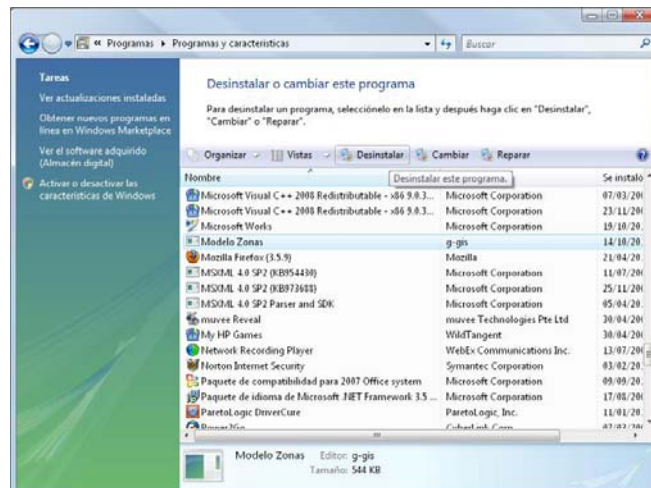


Figura A. 31. Desinstalación del aplicativo Modelo Zonas en la versión 9.3.1.

A.2.1.2 Instalación versión 10

1. La Instalación sobre la versión 10 consiste simplemente en dar doble clic sobre el archivo AddinModeloZonas.esriAddIn, el cual aparece en la carpeta del programa. A continuación aparecerá la siguiente ventana, en la cual se debe hacer clic en el botón InstallAdd-In.



Figura A. 32. Instalación del aplicativo Modelo Zonas en la versión 10.

2. En la versión 10 se puede verificar que el aplicativo está instalado seleccionando en el menú Customize/ Add-In Manager

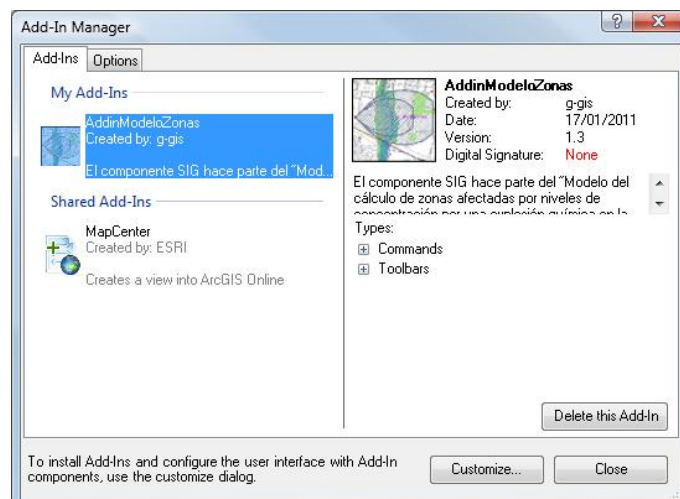


Figura A. 33. Verificación de la instalación del aplicativo Modelo Zonas en la versión 10.

3. Para **desinstalar** el Add-in de la versión 10 hay que oprimir el botón DeletethisAdd-in de la ventana de la Figura A. 33.
4. Oprimir en el teclado Ctrl-Alt-Sup para ir a la ventana de Administrador de Tareas de Windows y verificar que no haya ninguna ventana de ArcMap activa, si no hay que finalizar el proceso.

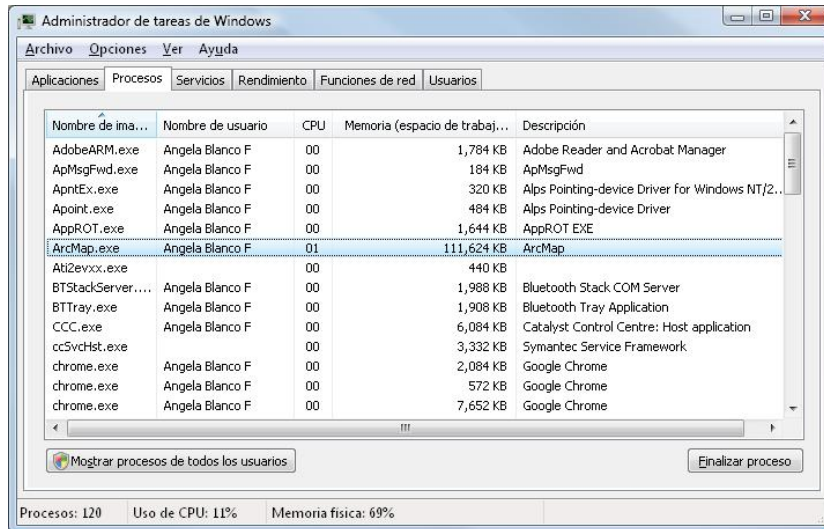


Figura A. 34. Ventana del administrador de tareas.

5. Y para que quede completamente desinstalada hay que eliminar el archivo con extensión *.dll que está almacenado en la siguiente carpeta.

C:\Users\

A.2.2 Trabajando con el aplicativo

1. El siguiente paso es abrir el proyecto MXD de ArcGIS con nombre *MXD_Tecnologico.mxd*, el cual contiene las capas geográficas con la simbología correspondiente. El módulo "**Modelo Zonas Afectadas**" se despliega a través del menú principal View-Toolbars-Modelo Zonas Afectadas para la versión 9.3 y en el botón Customize-Toolbars para la versión 10 de ArcGIS.

2. Verifique que los layers estén vinculados a las fuentes de las capas geográficas correspondientes. Especialmente para las capas de CONCENTRACIÓN Y EPICENTRO.

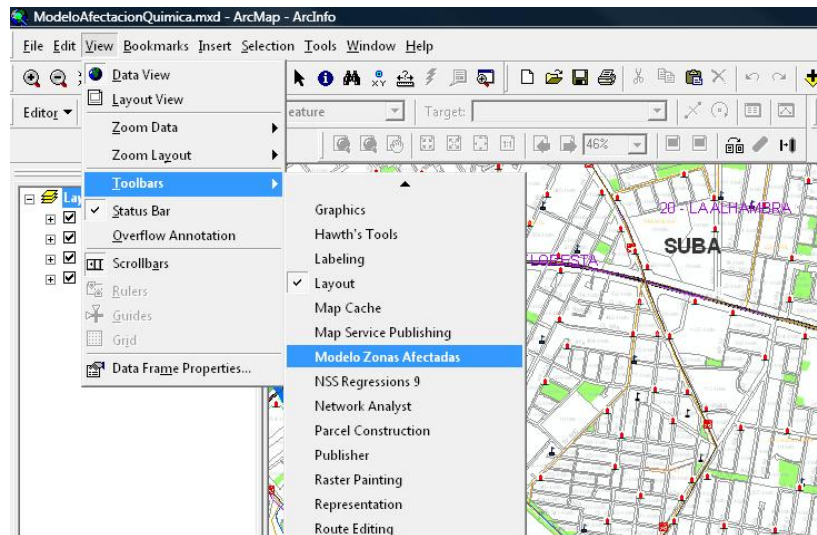
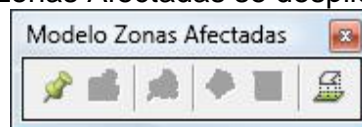
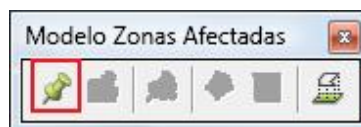


Figura A. 35. Barra de herramientas de ArcMap para la selección del aplicativo Modelo Zonas.

3. La herramienta Modelo Zonas Afectadas se despliega:



4. El primer botón permite al usuario ubicar el epicentro donde ocurre el evento. Para ubicar direcciones el FOPAE cuenta con el georreferenciador adquirido a la firma Servinformación que le permite con mayor precisión la localización de los puntos y sitios de interés a partir de la malla vial actualizada.

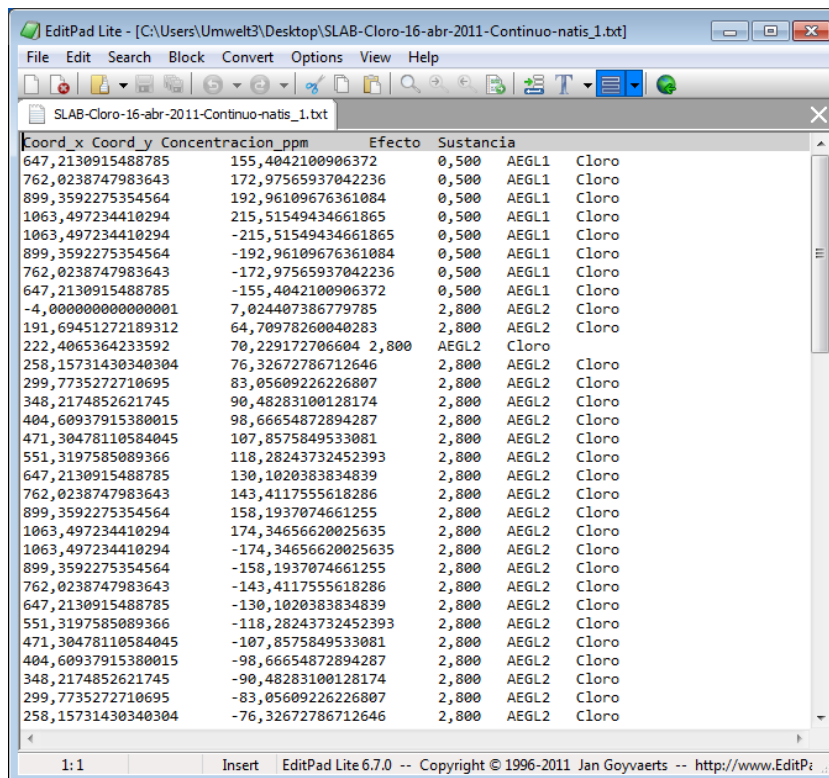


Las direcciones también pueden ser localizadas con las siguientes herramientas de uso libre que se encuentran en permanente validación y actualización: <http://www.sitimapa.com/> y <http://www.mapas.com.co>.

- Una vez es ubicado el punto, se ilumina un botón para cargar el archivo con extensión *.txt generado por el modelo químico y otro botón si se desea eliminar el punto.



El archivo *.txt contiene las columnas Coord_x, Coord_y, Concentracion_ppm, Efecto, Sustancia separados por espacios. El nombre del archivo no debe contener comas, puntos ni caracteres especiales, ni contener un nombre mayor a 500 caracteres.



Coord_x	Coord_y	Concentracion_ppm	Efecto	Sustancia
647,2130915488785	155,4042100906372	0,500	AEGL1	Cloro
762,0238747983643	172,97565937042236	0,500	AEGL1	Cloro
899,3592275354564	192,96109676361084	0,500	AEGL1	Cloro
1063,497234410294	215,51549434661865	0,500	AEGL1	Cloro
1063,497234410294	-215,51549434661865	0,500	AEGL1	Cloro
899,3592275354564	-192,96109676361084	0,500	AEGL1	Cloro
762,0238747983643	-172,97565937042236	0,500	AEGL1	Cloro
647,2130915488785	-155,4042100906372	0,500	AEGL1	Cloro
-4,000000000000001	7,024407386779785	2,800	AEGL2	Cloro
191,69451272189312	64,70978260040283	2,800	AEGL2	Cloro
222,4065364233592	70,229172706604	2,800	AEGL2	Cloro
258,15731430340304	76,32672786712646	2,800	AEGL2	Cloro
299,7735272710695	83,05609226226807	2,800	AEGL2	Cloro
348,2174852621745	90,48283100128174	2,800	AEGL2	Cloro
404,60937915380015	98,66654872894287	2,800	AEGL2	Cloro
471,30478110584045	107,8575849533081	2,800	AEGL2	Cloro
551,3197585089366	118,28243732452393	2,800	AEGL2	Cloro
647,2130915488785	130,1020383834839	2,800	AEGL2	Cloro
762,0238747983643	143,4117555618286	2,800	AEGL2	Cloro
899,3592275354564	158,1937074661255	2,800	AEGL2	Cloro
1063,497234410294	174,34656620025635	2,800	AEGL2	Cloro
1063,497234410294	-174,34656620025635	2,800	AEGL2	Cloro
899,3592275354564	-158,1937074661255	2,800	AEGL2	Cloro
762,0238747983643	-143,4117555618286	2,800	AEGL2	Cloro
647,2130915488785	-130,1020383834839	2,800	AEGL2	Cloro
551,3197585089366	-118,28243732452393	2,800	AEGL2	Cloro
471,30478110584045	-107,8575849533081	2,800	AEGL2	Cloro
404,60937915380015	-98,66654872894287	2,800	AEGL2	Cloro
348,2174852621745	-90,48283100128174	2,800	AEGL2	Cloro
299,7735272710695	-83,05609226226807	2,800	AEGL2	Cloro
258,15731430340304	-76,32672786712646	2,800	AEGL2	Cloro

Figura A. 36. Archivo .txt ingresado al programa ArcMap.

Nota: ArcMap tiene problemas para reconocer datos a partir de archivos planos con numeros separados con “,” y la configuracion regional Colombia. Para evitar inconvenientes se recomienda si tienen decimales colocarle al menos 3, asi sean 0.

Las coordenadas de este archivo son recalculadas en proyección cartográfica de Magna-SIRGAS Origen Bogotá-Bogotá a partir del epicentro ubicado por el usuario.

- El siguiente paso consiste en generar los polígonos de afectación con el botón resaltado en rojo, el cuál solicita al usuario el ángulo del viento. Si el ángulo es cero (0) la pluma de concentración se ubicara en el eje norte.



Las unidades de la dirección del viento es en grados decimales separados por comas. Así 30,5 corresponde a 30° 30' 00".

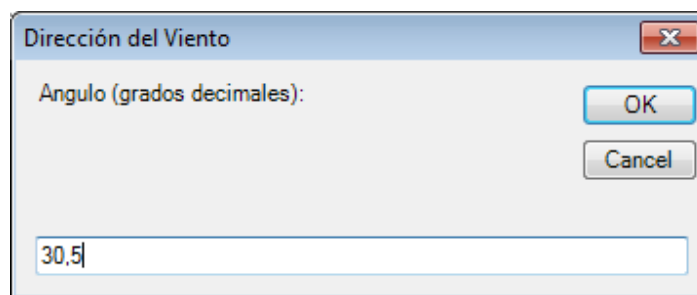


Figura A. 37. Ventana de dialogo para ingresar el ángulo de la nube tóxica y perfil obtenido.

Nota: Se debe verificar que el valor de rotación del DataFrame en la ventana Data Frame Properties sea 0.

- Una vez el polígono esté creado como gráfico se carga los FeatureClass de EPICENTROS Y CONCENTRACION_QUIMICA que se encuentran ubicados en la GeodatabaseModeloZonas.gbd. Los cuales almacenaran los polígonos y puntos para el análisis.

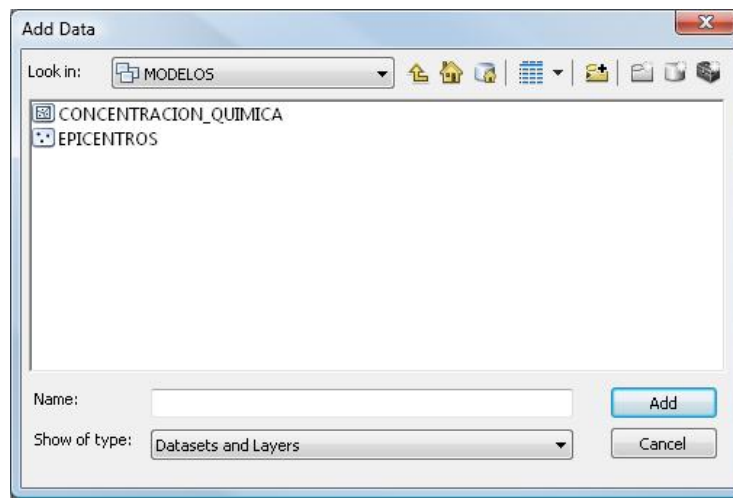


Figura A. 38. Ventana de adición de las Geodatabase a las coberturas.

- Luego se debe iniciar Edición de la barra de herramienta Editor sobre la GeodatabaseModeloZonas.gbd

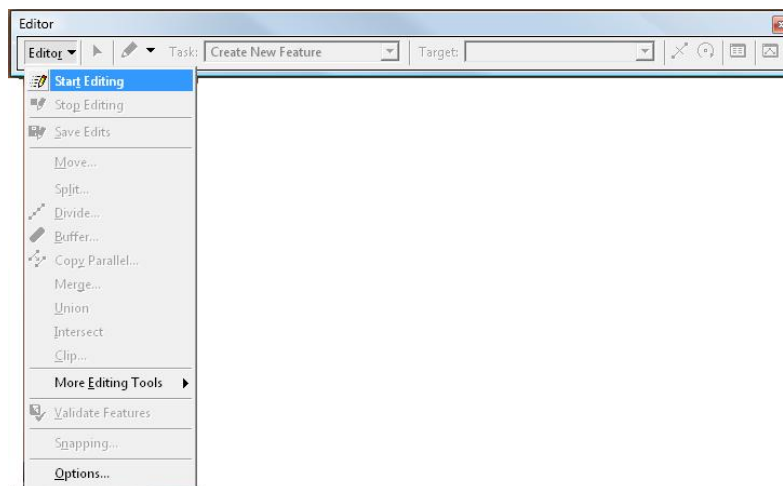


Figura A. 39. Ventana de inicialización del editor sobre la Geodatabase.

9. Una vez la edición esté iniciada se activa el botón de almacenar el polígono de la zona afectada y el punto del epicentro. Convirtiendo estos elementos como FeaturesClass en la Geodatabase. Los cuales pueden ser almacenados o exportados como shapefiles directamente por el usuario.



10. El área afectada almacenada como polígono debe ser seleccionada con la herramienta iluminada en rojo de la barra de herramientas del Editor para poder hacer la intersección

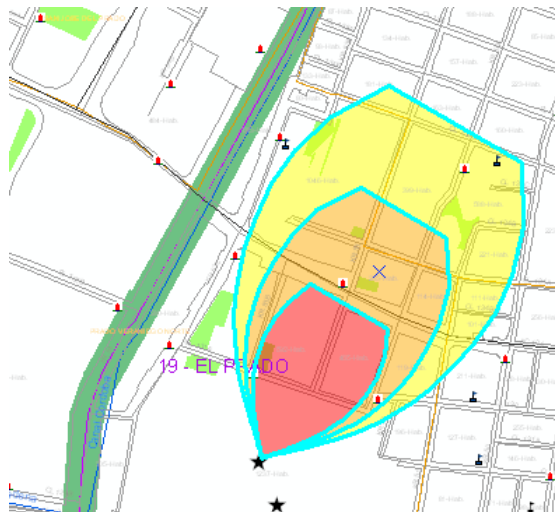
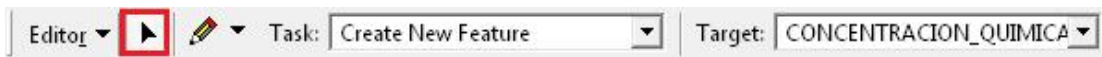


Figura A. 40. Selección de los contornos para determinar la afectación.

11. El usuario puede personalizar la simbología de los polígonos de isocontorno a través de las propiedades de la capa CONCENTRACION_QUIMICA, seleccionando rojo para el polígono más cercano al epicentro y amarillo al más alejado. Los valores RGB recomendados son los siguientes.

Tabla A. 11. Convenciones de colores recomendadas para los AEGLs.

AEGL	COLOR	R	G	B	Transparencia
1	Amarillo	251	234	81	50%
2	Naranja	240	197	103	50%
3	Rojo	226	51	82	50%

12. El paso a seguir es consultar la intersección de los polígonos de afectación con las diferentes capas geográficas que aparecen en el MXD con el siguiente botón:



Como resultado aparecerá un reporte de las intersecciones, el cual indica las coordenadas del epicentro, los elementos geográficos de intersección para cada isocontorno, el área de cada isocontorno y el nombre del archivo generado por el módulo químico.

El reporte presentará la intersección de las capas geográficas que estén activas en la tabla de contenido del mapa. Es así, si se desactiva la visualización de alguna capa no aparecerá ésta en el reporte.

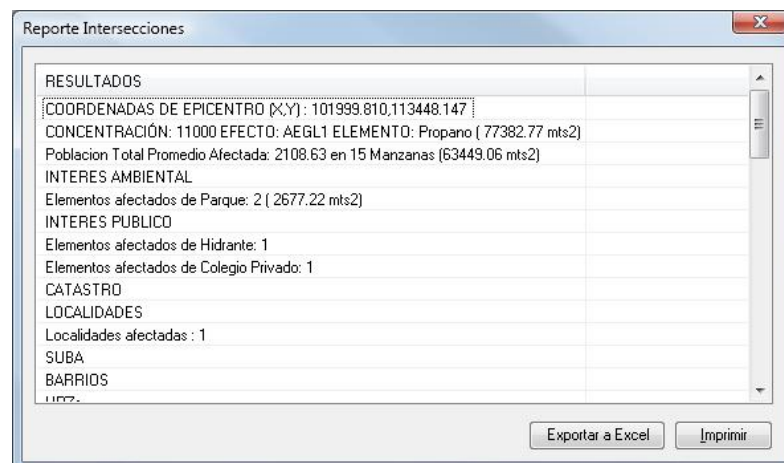


Figura A. 41. Reporte de afectación de los isocontornos sobre la zona de interés.

Este reporte puede ser exportado a formato CSV (del inglés comma-separated values) que es un tipo de documento en formato abierto sencillo para representar datos en forma de tabla.

13. El formato CVS se puede editar en una hoja de cálculo como MS. Excel o OpenOffice.

Para separar el archivo CVS en columnas con Excel 2003, se selecciona la columna, luego en el *menú* se selecciona *Datos / Texto en columna*. Luego en el paso 1 de 3 se selecciona *Delimitados* y en tabulación se coloca el símbolo de comilla (“) y por último el botón de *Finalizar*.

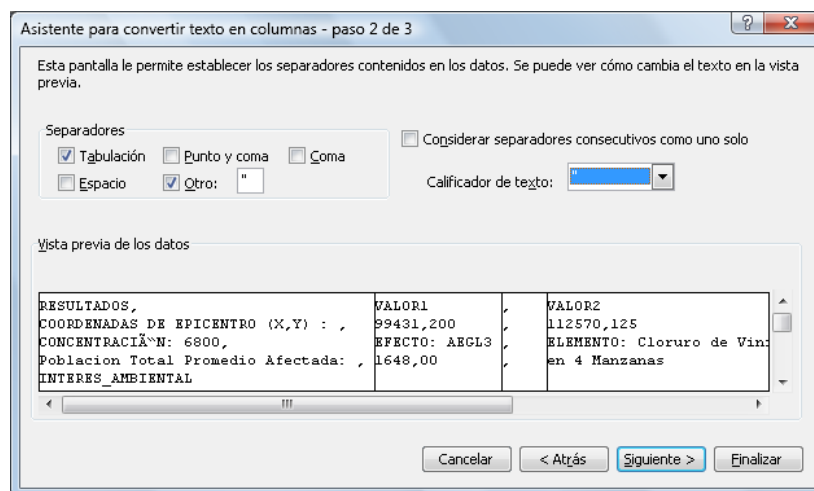


Figura A. 42. Ventana de edición de los resultados en Excel.

Así la tabla puede ser editada con las preferencias del usuario.

RESULTADOS	VALOR1	VALOR2	VALOR3
COORDENADAS DE EPICENTRO (X,Y) :	99431,2	112570,125	
CONCENTRACIÓN: 6800	EFEECTO: AEGL3	ELEMENTO: Cloruro de Vinilo	30157,33 mts2
Población Total Promedio Afectada:	1648	en 4 Manzanas	2456,23 mts2
INTERES_AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:		1 26,70 mts2	
INTERES_PUBLICO			
Elementos afectados de Hidrante:		1	
UPZs,	UPZs afectadas : 2	NIZA,LA FLORESTA	
CONCENTRACIÓN: 1600	EFEECTO: AEGL2	ELEMENTO: Cloruro de Vinilo	157331,16 mts2
Población Total Promedio Afectada:	417,08	en 11 Manzanas	147299,52 mts2
INTERES_AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:		1 42850,94 mts2	
INTERES_PUBLICO			
Elementos afectados de Torre alta tensión:		1	
Elementos afectados de Hidrante:		1	
UPZs	UPZs afectadas : 2	NIZA,LA FLORESTA	
CONCENTRACIÓN: 310	EFEECTO: AEGL1	ELEMENTO: Cloruro de Vinilo	310909,83 mts2
Población Total Promedio Afectada:	1031,85	en 15 Manzanas	300446,11 mts2
INTERES_AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:		2 98088,52 mts2	
INTERES_PUBLICO			
Elementos afectados de Torre alta tensión:		1	
Elementos afectados de Hidrante:		5	
BARRIOS	Barrios afectados : 2	GUILLERMO NUÑEZ, GUILLERMO NUÑEZ	
UPZs	UPZs afectadas : 3	EL RINCON, NIZA, LA FLORESTA	
Area total de los isocontornos :	498398,32		

Figura A. 43. Tabla de datos después de la edición realizada por el usuario.

14. El paso a seguir es imprimir el reporte en formato pdf, si en el equipo se tiene instalado PrimoPDF, CutePDF o cualquier otro programa para la exportación de archivos a PDF.

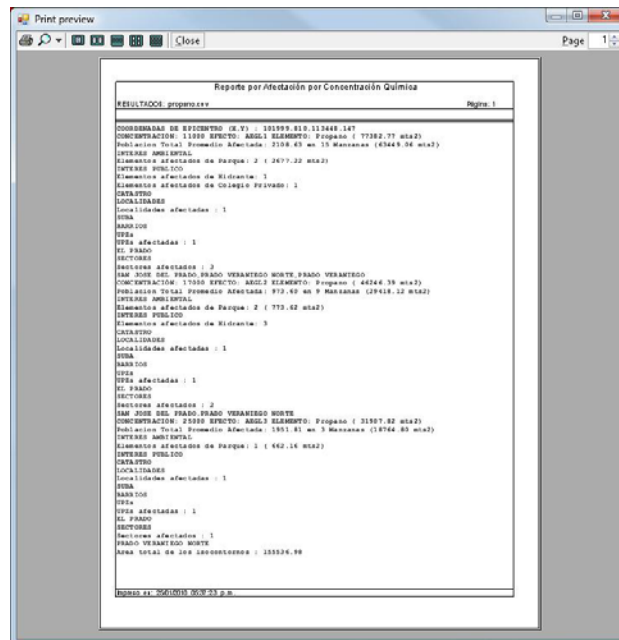


Figura A. 44. Reporte imprimible de la afectación de los isocontornos en la zona seleccionada por el usuario.

15. El mapa puede ser personalizado de acuerdo a la escala, con base en la plantilla mxt y ser exportado en JPG o PDF con las herramientas que incluye ArcGIS.

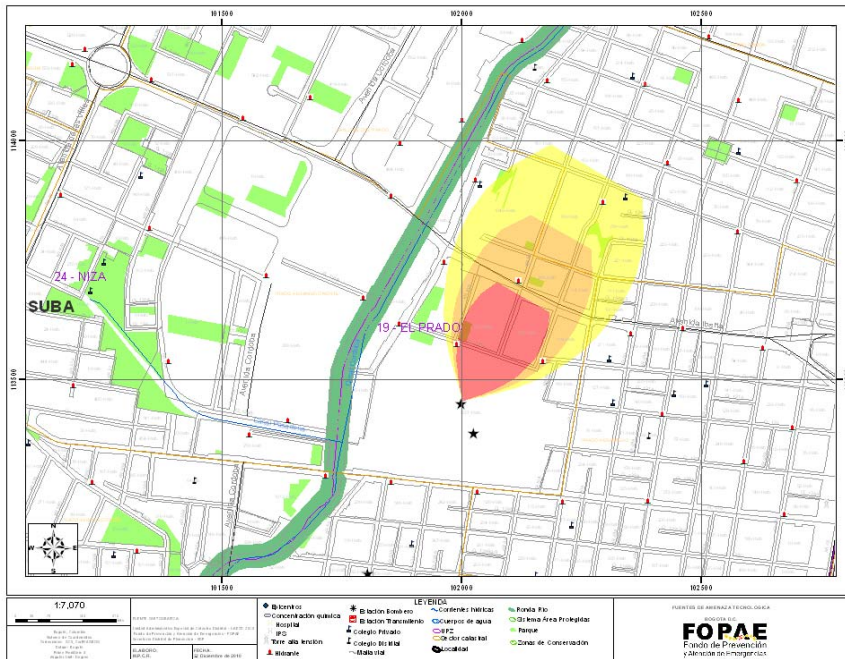


Figura A. 45. Reporte imprimible de la afectación de los isocontornos en la zona seleccionada por el usuario.

A.2.3 Actualizando datos

El aplicativo trabaja con dos Geodatabases. La primera Geodatabase **ModuloGeográfico.mdb** cuenta con los datos que el usuario puede actualizar al mapa. El archivo MXD_Tecnologico.mxd apunta a las capas que están almacenadas en la FileGeodatabase ... \ ModuloGeográfico.mdb



Si se almacena en otra ruta diferente a la Geodatabase el usuario debe enrutar cada layer a la capa correspondiente.

Las consultas de los reportes se hacen sobre las siguientes capas:

Tabla A. 12. Coberturas sobre las que se realiza la consulta de afectación en el Distrito Capital.

DataSet	FeatureClasse
CATASTRO	Capa: LOCALIDAD Capa: BARRIOS_SDP Capa: UPZ Capa: SECTOR_CATASTRAL
INTERES_AMBIENTAL	Todas las pertenecientes al dataset
INTERES_PUBLICO	Todas las pertenecientes al dataset
CATASTRO	Todas las pertenecientes al dataset
POBLACIÓN	Capa: POB_MZ_CATASTRO_DANE

De esta manera, si se desea agregar una nueva capa dentro de la Geodatabase debe ser incluida dentro de alguna de estos DataSet.

Para importar una capa dentro de DataSet el procedimiento es el siguiente:

1. Abrir ArcCatalog
2. Buscar la geodatabase ModuloGeográfico

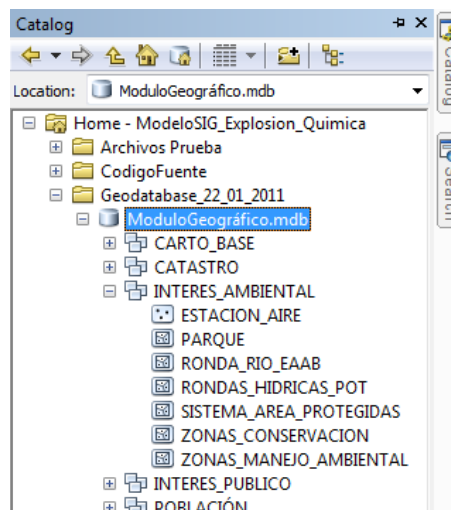


Figura A. 46. Ventana de selección del DataSet en la cual se desea agregar una capa.

3. Seleccionar el DataSet dónde se quiere cargar la capa geográfica nueva.

4. Clic derecho sobre el DataSet, luego la opción de Importar *Import* y por último la opción de Feature Class (Single).

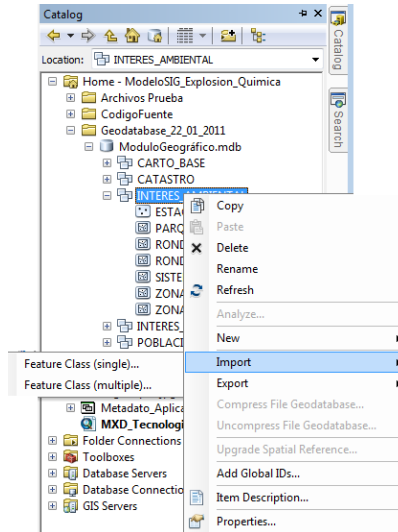


Figura A. 47. Importación de la capa.

5. Aparecerá una ventana que permite ingresar la capa geográfica que se desea importar en el campo de *Input Features* y en el campo de *Output Feature Class* se coloca el nombre de la Feature class como se va a llamar dentro de la Geodatabase

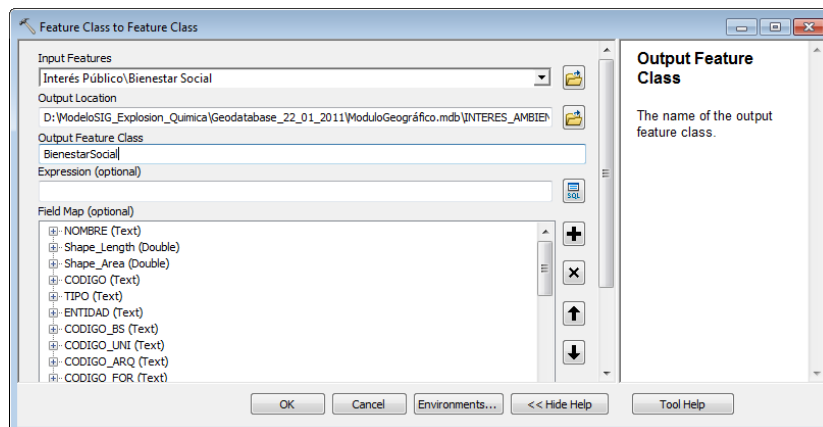
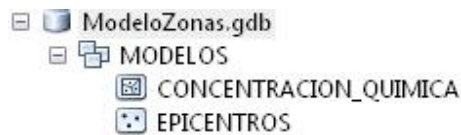


Figura A. 48. Ventana de importación de la capa geográfica.

Las capas LOCALIDAD, BARRIOS_SDP, UPZ, SECTOR_CATASTRAL y POB_MZ_CATASTRO_DANE deben conservar los nombres en los atributos como también el nombre del FeatureClass.

La siguiente **GeodatabaseModeloZonas.gdb** almacena los puntos y polígonos de isocontornos. Y allí se va almacenando los elementos que se generan una vez se corre el modelo.



Los atributos de las capas son los siguientes y se recomienda que no sean modificados.

Tabla A. 13. Atributos de las capas asociadas directamente al aplicativo Modelo Zonas.

FeatureClass	Atributos
CONCENTRACIÓN_QUIMICA	CONCENTRACION, EFECTO, ELEMENTO, AREA, PERIMETRO
EPICENTROS	ARCHIVO

La simbología del mapa puede ser modificada y actualizada por el usuario como también la presentación del marco, leyenda y escala del mapa.

Anexo B

CASOS DE ESTUDIO INFORMACIÓN DE ALMACENAMIENTO Y MEMORIAS DE CÁLCULO

B. 1 AMONIACO (NH₃)

El amoniaco es un gas incoloro, soluble en agua y con un olor característico. Su solución en agua tiene un pH alcalino, con un efecto corrosivo. Entre otros peligros que presenta esta sustancia se encuentra que puede generar riesgo de fuego al mezclarse con otros compuestos, aunque es considerado no inflamable. Es irritante y corrosivo, de ahí su toxicidad. Además, a pesar de ser más ligero que el aire llena la parte cercana al suelo en fugas de vapor (UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM), 2008).

Algunos de los usos del amoniaco son como refrigerante, en la preparación de fertilizantes y como fuente de nitrógeno (Servidio de Sanidad Ambiental, 2007; (UNAM), 2008).

B. 1.1 Almacenamiento de amoniaco

El amoniaco anhídrido (NH₃) es almacenado bajo presión como líquido a temperatura ambiente o completamente refrigerado a una temperatura de -33°C (su punto de ebullición a condiciones atmosféricas) y a presión atmosférica (Mannan, 2005).

Los materiales empleados en la construcción de contenedores y para el manejo de amoniaco deben ser resistentes a la temperatura y al SCC (Stress corrosión cracking, por sus siglas en inglés - Agrietamiento ocasionado por corrosión y esfuerzo de tensión). El material de construcción de tanques y contenedores de amoniaco es acero al carbón. (Mannan, 2005).

De acuerdo a Mannan (2005) se presentan a continuación los diferentes tipos de almacenamiento para amoniaco de acuerdo a la capacidad del contenedor y especificaciones técnicas.

B. 1.1.1 Almacenamiento a presión

Los contenedores de amoniaco para bajas capacidades son cilindros horizontales y para grandes capacidades contenedores esféricos. Se emplea comúnmente almacenamiento a presión en esferas con un rango de capacidad entre 300 y 500t, pero algunas esferas han sufrido SCC y se han dado de baja.

- Contenedores esféricos

Una esfera para el almacenamiento de amoniaco a presión debe ser diseñada para resistir el estrés causado cuando el contenedor se encuentra completamente lleno y la presión del vapor es la presión de vapor del amoniaco a la máxima temperatura de diseño más la presión parcial de cualquier gas inerte presente. La mínima temperatura de diseño debe ser -33°C , pero nunca debe ser mayor de 10°C .

- Contenedores secundarios

El contenedor de amoniaco debe tener un dique, el cual debe ser colocado afuera del radio de la esfera y debe tener más de 1 metro de altura, con capacidad de retener el 20% de la capacidad de la esfera.

- Instrumentación

Un contenedor de amoniaco debería tener alarmas en el nivel del líquido, en la presión y la temperatura. Adicionalmente el tanque debe contar con válvulas de liberación de presión y una válvula para rompimiento de vacío.

- Contenedores cilíndricos:

Un contenedor cilíndrico de amoniaco a presión debe ser diseñado para una presión de al menos 15.5 bar (224.8psi, 15.3 atm). Para el almacenamiento en un contenedor cilíndrico no se requiere un dique, pero si protección contra impactos.

B. 1.1.2 Contenedores semirefrigerados

Los contenedores para amoniaco semirefrigerado o semipresurizado son normalmente esféricas, las cuales deben cumplir con los mismos requerimientos de diseño de las esferas presurizadas para almacenamiento a temperatura ambiente. La principal diferencia entre el almacenamiento a temperatura ambiente y el almacenamiento semirefrigerado es que necesario suministrar enfriamiento y aislamiento. Para el aislamiento algunos materiales empleados son fibra de vidrio y espuma de poliuretano (PUF, por sus siglas en inglés).

B. 1.1.3 Almacenamiento con refrigeración

El amoniaco líquido es almacenado en tanques para almacenamiento atmosférico. Los tanques destinados para tal fin se han desarrollado a partir de los tanques convencionales para almacenamiento a presión atmosférica, algunos de los cuales cuentan actualmente con un sistema parecido al del LNG.

Este tipo de tanque puede ser de pared sencilla, los cuales cuentan con una pared de acero para baja temperatura, con aislamiento externo y una barrera de vapor. Un tanque de doble pared tiene una pared interna de acero de baja temperatura y una pared externa de acero al carbón con aislamiento en la mitad. La pared externa no es diseñada para resistir el líquido frío, por tal motivo actúa solo como contenedor. Por otro lado, un tanque con un sistema de doble integridad tiene un tanque interior, con a cubierta suspendida y una pared externa, las dos paredes son aceros para temperaturas bajas.

La selección para el tipo de aislamiento térmico depende del sistema del tanque. Los principales tipos de aislamiento son: fibra de vidrio, espuma de poliuretano (PUF, por sus siglas en inglés), aluminio de multicapas reflectivo y Styrofoam. Los tanques de doble pared emplean perlita y en los tanques de cubrimiento suspendido, este cuenta como otra forma de aislamiento.

Cuando se presenta una emergencia de amoniaco, contener el derrame no es suficiente. Si la superficie de emisión es todavía muy grande, la evaporación del líquido sigue siendo un peligro. Existen diferentes métodos para controlar el derrame, por ejemplo se puede controlar el drenaje el cual lleva el líquido a una fosa donde la evaporación es reducida o se puede detener el derrame con una espuma o manta. Sin embargo, La mejor herramienta para disminuir el área de evaporación es tener un dique alto.

Las emisiones durante la operación normal son despreciables. Las mayores fugas de amoniaco de tanques de almacenamientos se presentan principalmente durante el transporte y la transferencia.

B. 1.2 Escenarios de amoniaco

Las condiciones consideradas para el escenario de NH_3 se presentan a continuación. Como se mencionó anteriormente, se consideró el mayor almacenamiento de amoniaco en el distrito, el cual corresponde a 10 t en un tanque cilíndrico horizontal. Se plantearon dos escenarios de emisión. En el primero la fuga fue planteada en la tubería de conexión entre el carro tanque de transporte de amoniaco y el tanque estacionario empleado para su

almacenamiento y para la producción de amoniaco acuoso o hidróxido de amonio; en el segundo, la fuga fue planteada en la válvula de trasiego originando una emisión directamente desde el tanque. A continuación se presentan las condiciones de almacenamiento y las condiciones atmosféricas requeridas en los modelos.

Condiciones de almacenamiento:

- Capacidad de almacenamiento del tanque: 10 t.
- Volumen del tanque: 19,8 m³
- Diámetro de la tubería de escape: 0,036 m (1 ¼)
- Porcentaje de llenado del tanque: 85 %
- Presión de almacenamiento: 100 psig.

Condiciones atmosféricas:

Además de las condiciones de almacenamiento de la sustancia, para el cálculo de los perfiles de dispersión, es necesario conocer las condiciones atmosféricas de la liberación. Para conocer el comportamiento atmosférico se seleccionó la Carrera 44 # 10 A – 65 como epicentro de la emisión. De acuerdo a los polígonos de Thiessen generados a partir de la información climatológica del distrito, este punto se encuentra ubicado en el polígono correspondiente a Puente Aranda. Las condiciones climatológicas en este punto se presentan a continuación:

- Velocidad del viento promedio: 1,21 m/s
- Dirección del viento: 213,8°(Sur oeste - SW)

Información adicional para el cálculo de la dispersión del gas son:

- Humedad relativa: 70%
- Temperatura ambiente: 7°C (se consideró la temperatura mínima promedio para Bogotá, puesto que esta genera el escenario más crítico en términos de dispersión de gases).

Adicionalmente se asume que la dispersión del gas se da en un ambiente no confinado.

Para el cálculo de los perfiles de dispersión se emplean los valores de los Niveles Guía de Exposición Aguda (AEGs - Acute Exposure Guideline Levels, por sus siglas en inglés).

Tabla B. 1. Concentraciones de los AEGLs para amoníaco.

	10 min	30 min	60 min	4h	8h
AEGL1	30	30	30	30	30
AEGL2	220	220	160	110	110
AEGL3	2700	2600	1100	550	390

A continuación se presenta la memoria de cálculo para el primer escenario de emisión y los resultados del proceso de simulación de los dos escenarios de emisión planteados.

B. 1.2.1 ESCENARIO 1: Ruptura de tubería entre el tanque de transporte y el tanque estacionario

B. 1.2.1.1 Memoria de cálculo

Inicialmente se debe determinar la tasa de liberación del amoníaco a través de la tubería en la cual se presenta la fuga.

El primer paso es determinar las propiedades de almacenamiento del amoníaco en el tanque a partir de la información existente. El amoníaco a condiciones normales se presenta en forma gaseosa, por este motivo se almacena como gas licuado. En el escenario planteado el amoníaco se encuentra almacenado a 100 psi (689.475,9 Pa).

Para conocer si el amoníaco se encuentra en condiciones de equilibrio entre el gas y el líquido, o si se encuentra como líquido subenfriado o gas sobrecalentado, se consulta la gráfica de presión contra temperatura del amoníaco en equilibrio (Figura B. 1). En este caso, de acuerdo a las condiciones de almacenamiento, se conoce que el amoníaco está en condiciones de equilibrio puesto que el tanque se encuentra presurizado y lleno en un 85% de su capacidad, por tanto el 15% restante del volumen debe ser ocupado por amoníaco gaseoso en equilibrio con el líquido. Adicionalmente, el tanque está construido en acero al carbón el cual permite la transferencia de calor con el ambiente, por tanto es de esperar una temperatura cercana a la temperatura ambiente al observar las condiciones de equilibrio en la Figura B.1.

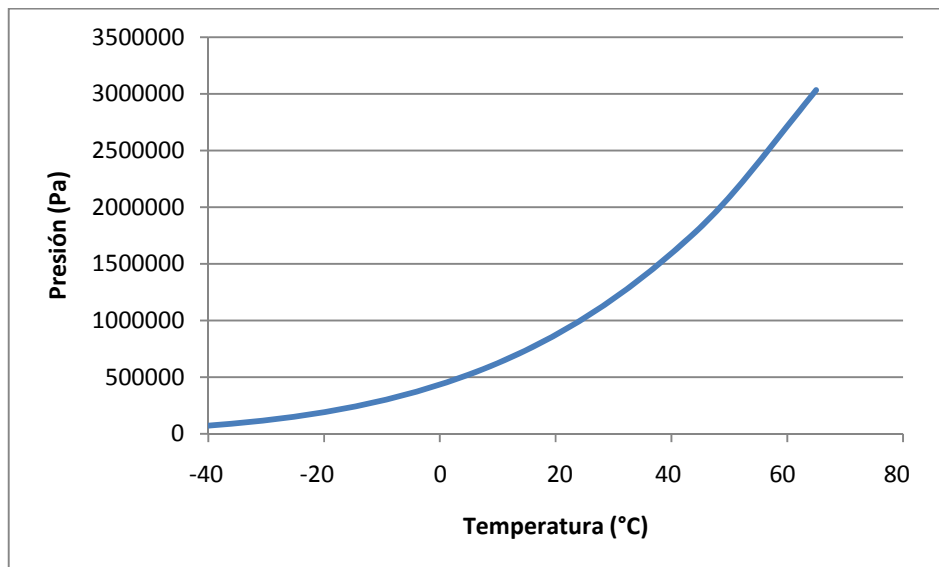


Figura B. 1 . Condiciones de equilibrio T(°C) vs P(Pa) para el NH₃.

El valor de la temperatura de equilibrio del amoníaco para una presión de 100 psig puede ser obtenida también a partir de la Ecuación B. 1, con la presión en mmHg y la temperatura en °C. Esta ecuación permite determinar la presión de vapor a una temperatura dada o la temperatura a una determinada presión de vapor. El valor obtenido para este escenario es de 12,9 °C.

$$P(\text{mmHg}) = 10^{7,58743 - \frac{1013,78}{(T(^{\circ}\text{C}) + 248,825)}} \quad \text{Ecuación B. 1}$$

Nótese que este valor corresponde aproximadamente al valor promedio de temperatura en Bogotá, 13,5 °C. De esta forma corroboramos que el líquido se encuentra en condiciones de equilibrio.

Teniendo en cuenta que la fuga se plantea en la tubería conectada a la fase líquida, se podrían presentar condiciones flash. Un gas licuado presenta condiciones flash cuando es almacenado bajo condiciones de presión iguales o por encima de la presión de vapor y es liberado al ambiente o a un contenedor con una presión inferior. Considerando las condiciones de almacenamiento del amoníaco en este escenario, donde la presión es igual a la presión de vapor, se emplea el modelo fuente para Flujo de dos fases (Sección 7.3.5.2), el cual es aplicable a *Líquidos flash almacenados a la presión de saturación* (Ecuación B. 2):

$$Q_m = \frac{\Delta H_v A}{v_{fg}} \sqrt{\frac{g_c}{TC_p}}$$

Ecuación B. 2

Donde:

$$v_{fg} = v_g - v_L$$

Ecuación B. 3

Siendo los valores para el amoniaco:

Tabla B. 2. Propiedades físicas y termodinámicas del amoniaco.

T_b (°C) ^a	T_b (K) ^a	ΔH_v (kJ/mol) ^b	C_p líquido (kJ/kg K) ^c	V_g (m ³ /kg) ^c	ρ_L (kg/m ³) ^d
-33,43	239,72	23,351	4,693	1,38	617,5

^a Punto de ebullición a 1 atm

^b Calor de vaporización a T_b y 1 atm.

Fuente: ^ay^b (Felder, 2005), ^c (Lyons, y otros, 2005), ^d (Welty, 2008)

A continuación se presentan los pasos a seguir para calcular la tasa de liberación.

Paso 1: Cálculo de la diferencia del volumen específico.

$$v_{fg} = v_g - v_L$$

$$v_{fg} = v_g - \frac{1}{\rho_L}$$

$$v_{fg} = 1,38 \frac{m^3}{kg} - \frac{1}{617,5 kg/m^3}$$

$$v_{fg} = 1,378 \frac{m^3}{kg}$$

Paso 2: Cálculo del área de la fuga en la tubería.

$$A = \pi * r^2$$

Ecuación B. 4

$$A = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$A = \pi * \left(\frac{0,036m}{2}\right)^2 = 0,00102m^2$$

Paso 3: Cálculo de la tasa de liberación másica (modelo fuente) del amoníaco en la tubería (Ecuación B. 5- Ecuación 1.5).

Para este cálculo se contempló una temperatura de 20°C, considerando las recomendaciones planteadas para el cálculo de una mayor tasa de liberación (Sección 7.2), las cuales indican que para el planteamiento de un escenario crítico debe emplearse la máxima temperatura ambiente. A mayores temperaturas, la evaporación y por tanto la dispersión de la sustancia son favorecidas.⁴⁰

$$Q_m = \frac{\Delta H_v A}{v_{fg}} \sqrt{\frac{g_c}{TC_p}}$$

Ecuación B. 6

$$Q_m = \frac{23,351 \frac{kJ}{mol} * \frac{1000J}{kJ} * \frac{N \cdot m}{J} * 0,00102m^2}{1,378 \frac{m^3}{kg} * \frac{kg}{1000g} * 17,03 \frac{g}{mol}} \sqrt{\frac{1 \frac{kg \cdot m}{s^2 N}}{293K * \frac{4,693kJ}{kg * K} * \frac{1000J}{kJ} * \frac{N \cdot m}{J}}}$$

$$Q_m = 0,865kg / s$$

⁴⁰ Los analistas deben realizar los Análisis de Riesgo considerando los escenarios de interés y el peor de los escenarios, en este último debe considerarse que las condiciones de la fuente pueden ser radicalmente diferentes a las condiciones atmosféricas, lo que obligará al analista a cuestionarse acerca de las temperaturas a utilizar en cada uno de los modelos.

Paso 4: Cálculo de la tasa de liberación como flujo volumétrico

$$\dot{V} = \frac{Q_m}{\rho} \quad \text{Ecuación B. 7}$$

$$\dot{V} = \frac{0,865 \frac{kg}{s}}{5,5 \frac{kg}{m^3}} = 0,157 \frac{m^3}{s}$$

Paso 5: Cálculo del tiempo en el cual se desocupa el tanque.

El tiempo en el cual se desocupa el tanque se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$t = \frac{m}{Q_m} \quad \text{Ecuación B. 8}$$

$$t = \frac{\rho * V}{Q_m}$$

$$t = \frac{617,5 \frac{kg}{m^3} * 18,8m^3 * 0,85}{0,865 \frac{kg}{s}}$$

$$t = 11407,6s = 190min = 3,16h$$

Paso 6: Cálculo del área de emisión – Área de la piscina

Para determinar el área de emisión se asume una altura de 1cm en la piscina formada por la liberación de amoniaco. Adicionalmente se asume una piscina circular.

Inicialmente se debe calcular el volumen total de líquido emitido. Teniendo el flujo másico, calculamos la masa total de amoniaco liberada a través de la fuga. El tiempo de liberación fue asumido como de 10 minutos, el cual es el valor común para el tiempo en el cual se obtiene una respuesta ante la emergencia.

$$m = Q_m * t$$

Ecuación B. 9

$$m = 0,865 \text{ kg} / \text{s} * 600 \text{ s}$$

$$m = 519 \text{ kg}$$

Para determinar el volumen total emitido empleamos la densidad del líquido:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Ecuación B. 10

$$V = \frac{519 \text{ kg}}{617,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V = 0,84 \text{ m}^3$$

$$V = A \cdot h$$

Ecuación 11

$$A = \frac{V}{h}$$

$$A = \frac{0,84 \text{ m}^3}{0,01 \text{ m}}$$

$$A = 84,04 \text{ m}^2$$

Paso 7: Cálculo de la fracción de vapor de la sustancia

De acuerdo a la Ecuación B.11, la fracción de vapor se calcula de la siguiente manera:

$$f_v = \frac{m_v}{m} = \frac{C_p(T_0 - T_b)}{\Delta H_v}$$

Ecuación B. 12

$$f_v = \frac{m_v}{m} = \frac{C_p(T_0 - T_b)}{\Delta H_v}$$

$$f_v = \frac{4,693 \frac{kJ}{kg * K} * 17,03 \frac{g}{mol} * \frac{kg}{1000g} * (293,15K - 239,72K)}{23,351 \frac{kJ}{mol}}$$

$$f_v = 0,18$$

B. 1.2.1.2 Simulación SiDiG (SLAB) – Aplicativo SIG

A continuación (Tabla B. 3) se presentan los datos de entrada al modelo SLAB implementado utilizando la herramienta de simulación SiDiG.

Tabla B. 3. Parámetros de entrada al modelo SLAB para el escenario de emisión de la piscina formado tras la ruptura de la tubería.

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Emisión de una piscina (pool) evaporándose
Parámetro del subpaso numérico	NCALC = 2
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Amoniaco
Peso molecular del material de la fuente (kg/mol)	WMS = 0.017031
Capacidad calorífica del vapor a presión constante (J/kg K)	CPS = 2170
Temperatura del punto de ebullición (K)	TBP = 239.72
Fracción másica del líquido inicial	CMEDO = 0.0
Calor de vaporización (J/kg)	DHE = 1370840
Capacidad calorífica del líquido (J/kg K)	CPSL = 4294
Densidad del líquido del material de la fuente (kg/m ³)	RHOSL = 682.8
Primera constante de la presión de saturación	SPB = 2132.52
Segunda constante de la presión de saturación (K)	SPC = -32.98
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	TS = 239.72
Flujo másico de la fuente (kg/s)	QS = 0.865
Área de la fuente (m ²)	AS = 84.04
Duración de la fuente continua (s)	TSD = 600
Masa de la fuente instantánea (kg)	QTIS = 0
Altura de la fuente (m)	HS = 0
Parámetros del Campo	
Tiempo para promediar la concentración (min)	TAV = 60
Distancia máxima en la dirección del viento (m)	XFFM = 1000 ⁴¹
Alturas del cálculo de concentración (m)	ZP= 0
Parámetros Meteorológicos	
Altura de la rugosidad de la superficie (m)	ZO = 0.03
Altura de la medición del ambiente (m)	ZA = 10
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	UA = 1.21
Temperatura del ambiente (K)	TA = 280.15
Humedad relativa (%)	RH = 70
Valores de la clase de estabilidad	STAB = F

⁴¹ La selección de este parámetro corresponde a lo enunciado en el manual del SiDiG A 1.5.5.1.

Los resultados obtenidos a partir de esta simulación se presentan en la Figura B. 2. Es importante resaltar que los valores empleados para el cálculo de la distancia segura y el perfil de concentración corresponden a los AEGLs para un tiempo de 60 minutos.

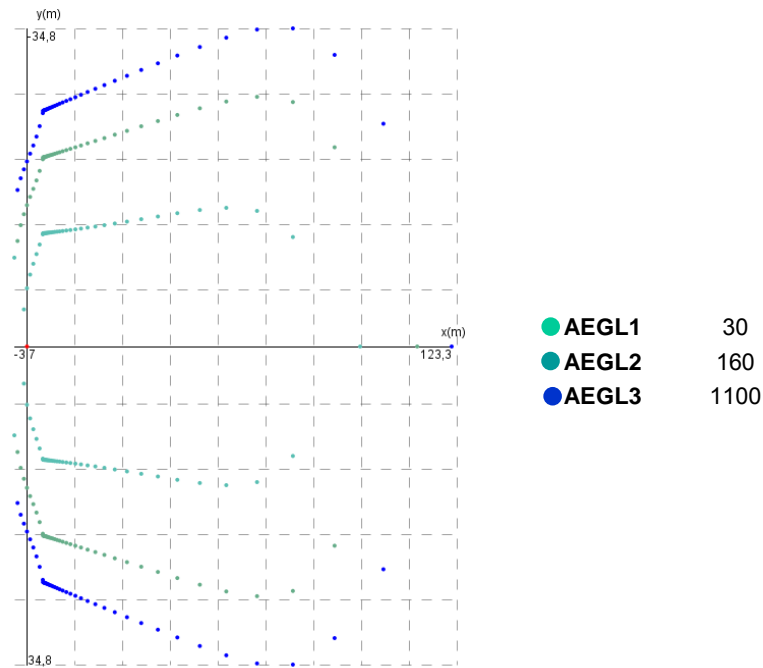


Figura B. 2. Resultados del modelo SLAB para el escenario de amoniaco planteado como ruptura en la tubería de conexión entre los dos tanques (TAV=60min).

Los resultados obtenidos a partir del modelo SLAB fueron alimentadas al aplicativo SIG, "Modelo Zonas", junto a la dirección del viento. La afectación sobre el distrito se presenta en la Figura B. 3 y en la Tabla B. 4.

Al ubicar la nube tóxica en el epicentro seleccionado en Puente Aranda y superponer las diferentes capas con información del distrito de Bogotá para las tres concentraciones evaluadas (AEGLs) se obtiene información detallada de la afectación causada para cada una de las concentraciones en cuanto a la población y los elementos de interés público, de interés ambiental y de la cartografía base. El aplicativo SIG diseñado genera una versión imprimible de la afectación o una versión que puede ser modificada en Excel.

- AEGL 3 (1100 ppm)

En la Tabla B. 4 se presenta la afectación causada por el AEGL 3 (1100 ppm). En esta se puede observar que la población afectada corresponde a 20 personas, adicionalmente la información presentada indica que la emisión se registró en la UPZ (Unidad de Planeamiento Zonal) de la Zona Industrial, la localidad de Puente Aranda, en el sector de Gorgonzola. Fueron afectados tres elementos de interés público, un elemento tecnológico, un elemento de la red de energía y un elemento de la red de acueducto. Sin embargo, no fueron afectados elementos de interés públicos asociados a altas concentraciones de población como colegios, estaciones de transmilenio o centros comerciales. La información suministrada por el aplicativo SIG también permite conocer el área total comprometida por la emisión y el área para cada uno de los AEGLs. El área correspondiente al AEGL 3 es de 2389,15 m², la cual corresponde al área cubierta por la nube; es decir, con concentraciones iguales o superiores a 1100 ppm.⁴²

⁴² El análisis del daño sobre infraestructura y servicios públicos depende de las características químicas del material. Por tanto, es importante consultar los límites de reactividad e inflamabilidad de la sustancia de análisis para conocer otro tipo de riesgos que se presenten con la emisión del gas tóxico.

Las redes de acueducto y alcantarillado deben considerarse como posibles vías de transporte del químico a otras locaciones diferentes al punto de origen de la emisión, generando nuevos epicentros.

Tabla B. 4. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 3 (1100 ppm).

RESULTADOS	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
Coordenadas de epicentro (X,Y) :	96991,77	102853,663	
CONCENTRACIÓN: 1100 ppm	EFEECTO: AEGL3	ELEMENTO: Amoniaco	2389,15 m²
Población Total Promedio Afectada:	20	en 1 Manzanas	2389,15 m ²
INTERES PÚBLICO			
Elementos afectados de Tecnológico:	1		
Elementos afectados de Red Energía:	1		
Elementos afectados de Red Acueducto:	1		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	PUENTE ARANDA	
UPZs	UPZs afectadas : 1	ZONA INDUSTRIAL	
SECTORES	Sectores afectados : 1	GORGONZOLA	

La población contemplada en los resultados de afectación obtenidos del aplicativo Modelo Zonas corresponde a población censal y no cubre población flotante.

- AEGL 2 (160 ppm)

Los resultados de la afectación del AEGL 2 se muestran en la Tabla B. 5. La población en este caso es de 4 personas, ubicadas en 1708,08 m² de una manzana, aunque el área total comprometida por la nube del AEGL 2 es de 2565,76 m². Los elementos de interés público involucrados son en total 9, entre los cuales se encuentran: un hidrante, dos redes de energía, una red sanitaria y cinco elementos de la red de acueducto. De igual manera como ocurre con el AEGL 3, elementos de interés público que involucran una población mayor no se ven involucrados dentro de la nube tóxica de concentración 160 ppm. Este resultado es consistente con la ubicación del epicentro y las dimensiones de la nube tóxica, puesto que la UPZ de la Zona Industrial se encuentra involucrada principalmente, como su nombre lo indica, con la actividad económica industrial, por tanto no es una zona de confluencia de población. El AEGL 2 se encuentra ubicado, tal como el AEGL 3, en la UPZ Zona Industrial, en la localidad de Puente Aranda en el sector de Gorgonzola.



	<p style="text-align: center;">CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	
---	--	---

Tabla B. 5. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 2 (160 ppm).

RESULTADOS	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
Coordenadas de epicentro (X,Y) :	96991,77	102853,663	
CONCENTRACIÓN: 160 ppm	EFEECTO: AEGL2	ELEMENTO: Amoniaco	2565,76 m²
Población Total Promedio Afectada:	3,21	en 1 Manzanas	1708,09 m ²
INTERES PUBLICO			
Elementos afectados de Hidrante:	1		
Elementos afectados de Red Energía:	2		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	1		
Elementos afectados de Red Acueducto:	5		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	PUENTE ARANDA	
UPZs	UPZs afectadas : 1	ZONA INDUSTRIAL	
SECTORES	Sectores afectados : 1	GORGONZOLA	

- AEGL 1 (30 ppm)

El AEGL 1 tiene una influencia sobre un área de 1988,02 m², involucrando una población de 2 personas, ubicadas en dos manzanas. Los elementos de interés público afectados para el AEGL 1 son siete: un elemento de la red de energía, dos elementos de la red sanitaria y cuatro elementos de la red de acueducto. La ubicación del AEGL 1 en términos de localidad, UPZ y sector es la misma del AEGL 2 y el AEGL 3. Los resultados de la afectación se presentan en la Tabla B. 6.



	<p style="text-align: center;">CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	
---	--	---

Tabla B. 6. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 1 (30 ppm).

RESULTADOS	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
Coordenadas de epicentro (X,Y) :	96991,77	102853,663	
CONCENTRACIÓN: 30 ppm	EFEECTO: AEGL1	ELEMENTO: Amoniaco	1988,02 m²
Población Total Promedio Afectada:	1,78	en 2 Manzanas	996,46 m ²
INTERÉS PÚBLICO			
Elementos afectados de Red Energía:	1		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	2		
Elementos afectados de Red Acueducto:	4		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	PUENTE ARANDA	
UPZs	UPZs afectadas : 1	ZONA INDUSTRIAL	
SECTORES	Sectores afectados : 1	GORGONZOLA	

B. 1.2.1.3 Simulación SiDiG (Briter McQuaid) – Aplicativo SIG

La simulación del escenario fue realizada adicionalmente con el modelo Briter McQuaid, en la Tabla B. 7 se presentan los datos de entrada para este modelo. La herramienta de simulación cuenta con una base de datos para las sustancias, sin embargo la densidad debe ajustarse de acuerdo a las condiciones de la fuente. El modelo Briter McQuaid considera la emisión como un flujo de gas; es decir, no contempla la posibilidad de un flujo mixto de gas/líquido. Por tal motivo es importante emplear las condiciones del gas a la temperatura y presión de liberación, estas se ven reflejadas en la densidad del gas. La densidad de la sustancia a diferentes condiciones de presión y temperatura puede ser obtenida de tablas de propiedades físicas o de herramientas de simulación como Aspen Plus®.

Tabla B. 7. Parámetros para la simulación de una piscina de amoniaco generada por ruptura de la tubería empleando el modelo Britter-McQuaid.⁴³

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Emisión continua
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Amoniaco
Densidad característica del material de la fuente (kg/m ³)	RHO = 5,5
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	TS = 239,78
Flujo volumétrico de la fuente (m ³ /s)	QT = 0,157
Radio de la fuente (m)	R = 5,18
Parámetros Meteorológicos	
Densidad característica del aire del ambiente (kg/m ³)	RHOA = 0,9
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	UA = 1,21

Los resultados obtenidos a partir de este modelo para el escenario planteado de amoniaco se presentan en la Figura B. 4. En esta se puede observar únicamente la gráfica del AEGL3, es decir el perfil para la máxima concentración en un tiempo de 10 minutos (2700ppm). Este tiempo corresponde al tiempo en el cual el modelo Britter McQuaid calcula los perfiles de concentración para las sustancias de acuerdo a los nomogramas.

Solamente se presentan este resultado debido a que Britter McQuaid es un modelo empírico, el cual no puede llegar a extrapolar valores y este no posee datos aplicables a las condiciones de menor concentración en este escenario.

⁴³ La densidad del aire es calculada a partir de las correlaciones planteadas por el Comité Internacional de Pesos y Medidas (CIPM) (2007), las cuales pueden ser utilizadas en la página web del Centro Nacional de Meteorología de México (CENAM) en el link <http://www.cenam.mx/publicaciones/cdensidad.aspx>. Las fórmulas para el cálculo de la densidad del aire (CIPM 1981/91) se encuentran disponibles adicionalmente en http://www.dolzhnos.com.ar/htm/densidad_del_aire.htm.

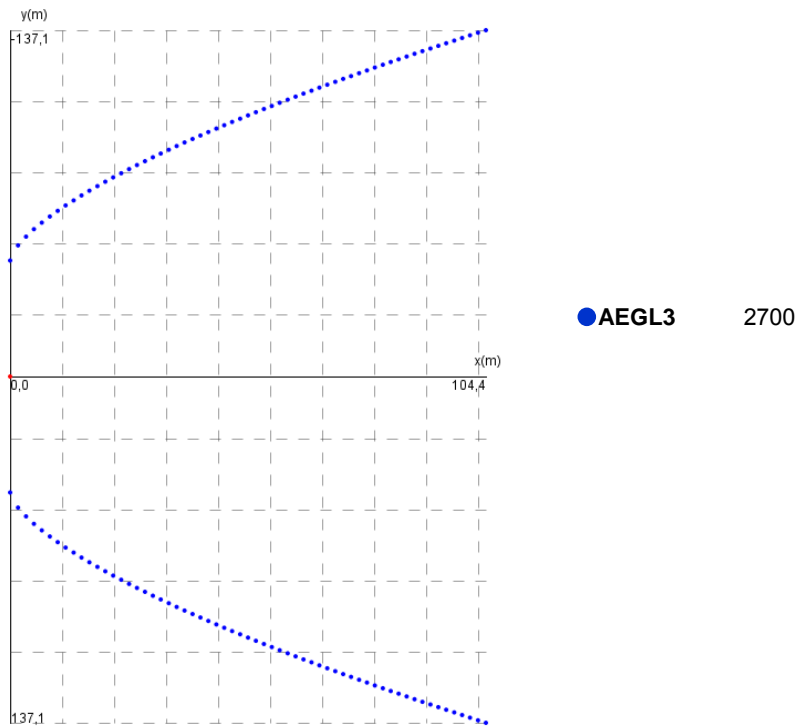


Figura B. 4. Resultados del modelo Britter - McQuaid para el escenario de amoníaco planteado como ruptura en la tubería de conexión entre los dos tanques (TAV=10min).

Para determinar la afectación a partir de los resultados obtenidos con el modelo Britter McQuaid, se empleó la misma locación del epicentro que en el modelo SLAB. En la siguiente tabla se presentan los resultados arrojados por el aplicativo SIG, *Modelo Zonas*.

Los elementos de interés distrital afectados por la nube tóxica obtenida del modelo Britter McQuaid se presentan en la Tabla B. 8. Como se mencionó anteriormente, estos corresponden al AEGL 3 (2700 ppm).

De acuerdo al aplicativo SIG, la población afectada por el AEGL 3 es de 36 personas ubicadas en un área de 21007,23 m², distribuidas en 5 manzanas. Al igual que la dispersión determinada por el modelo SLAB, el modelo Britter McQuaid ubica la nube tóxica dentro de la UPZ Zona Industrial, en Puente Aranda, en el sector Gorgonzola. Los elementos afectados determinados por Britter McQuaid son de interés público e interés ambiental. El elemento de interés ambiental corresponde a un parque de 103,50 m². Aunque este parque no se encuentre directamente asociado a una población específica asociada a un censo, es posible que la presencia de este parque dentro de la región del AEGL 3 incrementa bajo determinadas condiciones la población afectada por la emisión. Los 24 elementos de interés público involucrados corresponden a las redes de energía, sanitaria y acueducto; a elementos tecnológicos, hidrantes y un bienestar social. Entre estos, el único involucrado con una población alta es el Bienestar Social.

Es importante aclarar que aunque los elementos de interés público como hidrantes o redes de acueducto no estén relacionados con una población directa, compuestos como el amoniaco pueden diluirse en el agua en caso de que esta se encuentre expuesta y generar efectos a quien la consuma.



	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	
---	--	---

Tabla B. 8. Afectación causada por el escenario de amoniaco planteado como ruptura en la tubería simulado en Britter McQuaid en la zona de Puente Aranda.

RESULTADOS	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
COORDENADAS DE EPICENTRO (X,Y) :	96989,217	102854,113	
CONCENTRACIÓN: 2700 ppm	EFFECTO: AEGL3	ELEMENTO: Amoniaco	21007,23 m²
Poblacion Total Promedio Afectada:	35,36	en 5 Manzanas	3127,68 m ²
INTERES AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:	1	103,50 m2	
INTERES PUBLICO			
Elementos afectados de Hidrante:	2		
Elementos afectados de Bienestar Social:	1		
Elementos afectados de Tecnológico:	2		
Elementos afectados de Red Energía:	11		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	11		
Elementos afectados de Red Acueducto:	15		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	PUENTE ARANDA	
UPZs	UPZs afectadas : 1	ZONA INDUSTRIAL	
SECTORES	Sectores afectados : 1	GORGONZOLA	

B. 1.2.1.4 Simulación en ALOHA®

El escenario planteado anteriormente fue simulado con la herramienta ALOHA®. En la Tabla B. 9 se presentan los datos de entrada al modelo, las condiciones atmosféricas alimentadas y los datos de salida. Adicionalmente, en la Figura B. 6 se presentan los perfiles de dispersión calculados por ALOHA®. Una observación importante respecto a la simulación realizada en este programa, es que esta fue realizada con un modelo Gaussiano. De acuerdo a las condiciones de emisión y del gas, el programa decide el modelo a emplear, para este caso fue elegido *Gaussiano* en lugar de *Gas Denso* (Heavy Gas, por su nombre en inglés).



 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

Tabla B. 9. Reporte de la simulación realizada en ALOHA para el escenario de amoniaco planteado como ruptura en la tubería de conexión entre los dos tanques.

Condiciones atmosféricas	
Velocidad del viento (m/s)	1,21
Dirección del viento (°)	213
Altura de la medición ambiente (m)	10
Rugosidad (m)	0,03
Nubosidad (0-10)	10
Temperatura del aire (K)	280,15
Clase de estabilidad	F
Humedad (%)	70
Atura de la inversión térmica	No hay inversión
Propiedades de la fuente (Parámetros de entrada)	
Fuente	Piscina (Puddle)
Área de la piscina (m ²)	84,04
Profundidad promedio de la piscina (cm)	1
Tipo de suelo	Concreto
Temperatura del suelo (K)	Usar la temperatura del aire si no es conocida
Temperatura inicial de la piscina (K)	239,72
Propiedades fuente (Parámetros de salida)	
Duración de la emisión (min)	24
Máxima tasa de liberación (lb/min)	183
Total cantidad emitida (lb)	1263
Total cantidad emitida (kg)	573

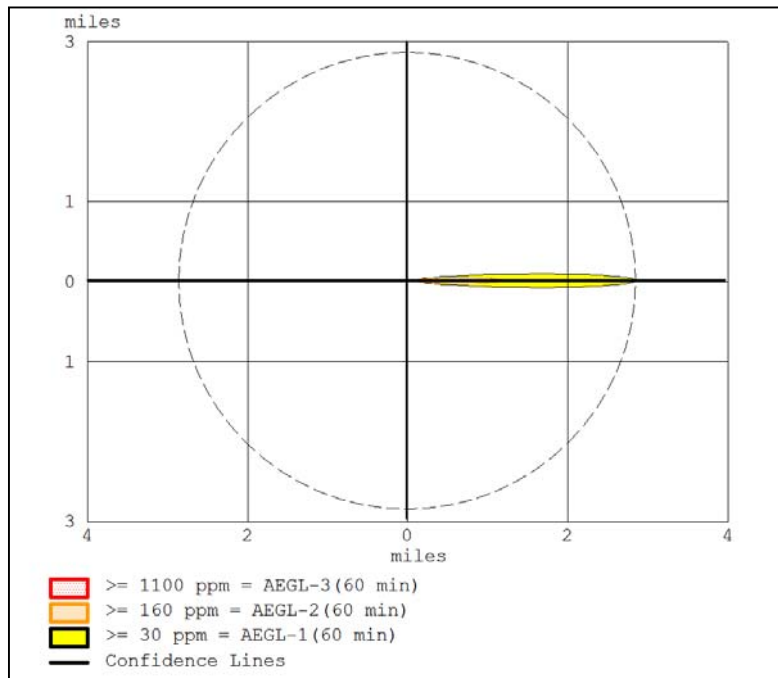


Figura B. 6. Simulación realizada en ALOHA para el escenario de amoniaco para el escenario planteado como ruptura en la tubería.

B. 1.2.1.5 Guía para el análisis de resultados de los modelos – Ventajas y desventajas

En cuanto a las ventajas y desventajas de los diferentes software e información suministrada por las guías de seguridad (GRE, en particular), se pueden listar las siguientes características como las más relevantes.

- Las guías de seguridad, como es el caso de la de la Guía de Respuesta en Caso de Emergencia 2008 (GRE 2008), suministran información a partir de los reportes históricos de accidentes de las sustancias tóxicas. Este punto representa una ventaja frente a los modelos puesto que tiene como base los reportes de accidentes, es decir información real de las emisiones, mientras que los modelos se basan en cálculos matemáticos a partir de aproximaciones empíricas o fenomenológicas de los procesos de emisión y dispersión.
- El software ALOHA® es una herramienta computacional de uso simple, la cual permite establecer los valores de emisión desde la fuente o permite calcularlos a partir de la información suministrada sobre la geometría y las

características de la fuente. Sin embargo este programa no permite la manipulación de algunas propiedades de las dispersiones y de las emisiones. Un ejemplo de este último punto es la imposibilidad el tipo de modelo con el cual se va a correr la simulación. Para el caso de las emisiones de cloro y de amoniaco, el programa seleccionó por defecto un modelo Gaussiano y un modelo para gases más densos que el aire respectivamente; sin embargo, para estos dos gases se debería llevar a cabo una simulación con un modelo para gases más densos que el aire, puesto que se ha comprobado que estos se acumulan en la parte inferior de la atmosfera cuando son emitidos. Otra de las ventajas de este programa es que ha sido validado por la US EPA, validando su aplicabilidad.

- En cuanto a SiDiG, existen diferentes ventajas y desventajas para los modelos programados, SLAB y Britter McQuaid. SLAB es un modelo más robusto, comparado con Britter McQuaid, pero de la misma forma requiere un mayor número de parámetros para correr la simulación. Los dos modelos han sido ampliamente aplicados a la simulación de gases más densos que el aire (Dillion, 2009) (Duijm, Ott & Nielsen, 1996). Teniendo en cuenta la comparación presentada anteriormente de estos dos modelos frente a los resultados de dispersión obtenidos con el modelo CFD (Sección 5.2.1), estos modelos son una primera aproximación ya que herramientas más detalladas existen en el mercado. Sin embargo, Britter McQuaid y SLAB representan una buena aproximación. Una ventaja adicional del programa SiDiG es que este cuenta con una base de datos de las propiedades del programa.

B. 1.2.1.6 Comparación de resultados

A manera de conclusión, esta sección presenta un resumen de los resultados de los programas empleados en el cálculo de los perfiles de concentración y los compara con la Guía de Respuesta en Caso de Emergencia (GRE) (Guía de Respuesta en Caso de Emergencia (GRE), 2008).

En la Tabla B. 10 se presentan los resultados de la distancia segura calculada por el programa ALOHA® y el modelo SLAB, los cuales son calculados para un tiempo de 60 minutos, junto a la distancia segura reportada por la GRE para una emisión de un envase pequeño o una fuga pequeña de un tanque grande en condiciones noche, las cuales fueron las empleadas para determinar la dispersión de amoniaco en el escenario planteado. Se consideran los valores recomendados para emisiones desde envases pequeños, teniendo en cuenta que los contenedores de

amoniaco pueden tener un volumen hasta de 500t (Sección B. 1.1), y el escenario contemplado en la memoria de cálculo considera una fuga en la cual no se vacía todo el contenedor con capacidad de 10t. Las emisiones pequeñas en la GRE consideran envases hasta de 200 litros.

Tabla B. 10. Resultados de las simulaciones en ALOHA® y programa SLAB, comparadas con la GRE (Escenario de ruptura de tuberías) – TAV= 60min.

	ALOHA (m)	SLAB (m)	GRE (m)
AEGL1 (30ppm)	4670	123,3	200
AEGL2 (160ppm)	1930	113,3	-
AEGL3 (1100 ppm)	760	96,72	-

La Tabla B. 11 presenta los resultados de los modelos SLAB y Britter McQuaid para la distancia segura, los cuales fueron obtenidos para un tiempo de 10 minutos. Estos se comparan nuevamente con la GRE para dispersión en la noche de emisiones pequeñas.

Tabla B. 11. Resultados de las simulaciones SLAB y el programa Britter McQuaid, comparadas con la GRE – TAV= 10min.⁴⁴

	SLAB (m)	Britter-McQuaid (m)	GRE (m)
AEGL1 (30ppm)	123,3	104,37	200
AEGL2 (220ppm)	107,3		-
AEGL3 (2700 ppm)	60,2		-

B. 1.2.2 ESCENARIO 2: Fallo en la válvula de trasiego, emisión directamente desde el tanque

Para este escenario se presentan únicamente los resultados de las simulaciones.

B. 1.2.2.1 Simulación SiDiG (SLAB) – Aplicativo SIG

La Tabla B. 12 presenta los datos de entrada al modelo SLAB implementado utilizando la herramienta de simulación SiDiG. En la Figura B. 7 se presentan los perfiles de concentración obtenidos para esta sustancia bajo las condiciones de emisión planteadas.

⁴⁴ Se presentan los resultados de la simulación realizada con el modelo SLAB pero para un tiempo para promediar la concentración (TAV) de 10 minutos, de tal forma que se pueda comparar con el modelo Britter McQuaid. Sin embargo, para estos resultados de SLAB no se presentó la afectación.

Tabla B. 12. Parámetros de entrada al modelo SLAB para el escenario planteado como emisión directa desde el tanque.

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Emisión de una piscina (pool) evaporándose
Parámetro del subpaso numérico	NCALC = 8
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Amoniaco
Peso molecular del material de la fuente (kg/mol)	WMS = 0.017031
Capacidad calorífica del vapor a presión constante (J/kg K)	CPS = 2170
Temperatura del punto de ebullición (K)	TBP = 239.72
Fracción másica del líquido inicial	CMEDO = 0.0
Calor de vaporización (J/kg)	DHE = 1370840
Capacidad calorífica del líquido (J/kg K)	CPSL = 4294
Densidad del líquido del material de la fuente (kg/m ³)	RHOSL = 682.8
Primera constante de la presión de saturación	SPB = 2132.52
Segunda constante de la presión de saturación (K)	SPC = -32.98
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	TS = 239.72
Flujo másico de la fuente (kg/s)	QS = 13.7
Área de la fuente (m ²)	AS = 100
Duración de la fuente continua (s)	TSD = 600
Masa de la fuente instantánea (kg)	QTIS = 0
Altura de la fuente (m)	HS = 0
Parámetros del Campo	
Tiempo para promediar la concentración (min)	TAV = 60
Distancia máxima en la dirección del viento (m)	XFFM = 1000
Alturas del cálculo de concentración (m)	ZP= 0
Parámetros Meteorológicos	
Altura de la rugosidad de la superficie (m)	ZO = 0.03
Altura de la medición del ambiente (m)	ZA = 10
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	UA = 1.21
Temperatura del ambiente (K)	TA = 280.15
Humedad relativa (%)	RH = 70
Valores de la clase de estabilidad	STAB = F

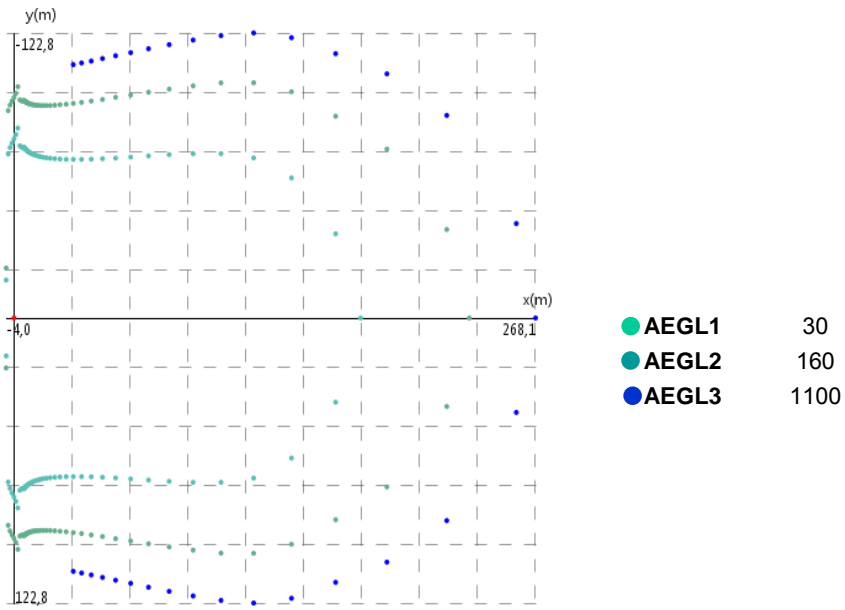


Figura B. 7. Simulación realizada en SLAB para el escenario de amoniaco plateado como emisión directa desde el tanque (TAV= 60min).

La emisión planteada desde el tanque se presenta bajo las mismas condiciones que la emisión planteada como ruptura de la tubería y en el mismo origen. Los resultados de afectación obtenidos corresponden a los tres perfiles de concentración obtenidos para los tres AEGLs correspondientes a un tiempo de 60 minutos.

- AEGL 3 (1100 ppm)

La Tabla B. 13 muestra los resultados de afectación obtenidos para el AEGL 3 (1100 ppm). La nube tóxica asociada a esta concentración se encuentra en la UPZ Zona Industrial, en la localidad de Puente Aranda, en el sector de Gorgonzola. La región involucrada contempla una población total de 32 personas, ubicadas en 4 manzanas en un área de 10859,25 m². Los elementos afectados son de interés público e interés ambiental. El AEGL 3 tiene una cobertura que abarca 465,66m² de un parque y entre los elementos de interés público se encuentran contemplados hidrantes, elementos tecnológicos, de la red de energía, sanitaria y del acueducto.

Tabla B. 13. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 3 (1100 ppm).

RESULTADOS	VALOR1	VALOR2	VALOR3
Coordenadas de epicentro (X,Y):	96999,522	102840,09	
CONCENTRACIÓN: 1100 ppm	EFEECTO: AEGL3	ELEMENTO: Amoniaco	22935,09 m²
Poblacion Total Promedio Afectada:	32	en 4 Manzanas	10859,25 m ²
INTERES AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:	1	465,66 m ²	
INTERES PÚBLICO			
Elementos afectados de Hidrante:	1		
Elementos afectados de Tecnológico:	2		
Elementos afectados de Red Energía:	10		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	8		
Elementos afectados de Red Acueducto:	15		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	Puente Aranda	
UPZs	UPZs afectadas : 1	Zona Industrial	
SECTORES	Sectores afectados : 1	Gorgonzola	

- AEGL 2 (160 ppm)

La afectación del AEGL 2 se presenta en la Tabla B.14, la región correspondiente al AEGL 2 es de 17619,31 m² en la UPZ Zona Industrial, en la localidad de Puente Aranda, en el sector de Gorgonzola. La población afectada se encuentra ubicada en 7 manzanas y son 4 personas. Los elementos de interés ambiental involucrados son dos parques, con un área de 985,6 m². Por otro lado, los elementos de interés ambiental son: un hidrante, dos instituciones de bienestar social, un elemento tecnológico, veinte elementos de la red de energía, quince elementos de la red sanitaria y quince elementos de la red de acueducto.

Tabla B. 14. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 2 (160 ppm).

RESULTADOS	VALOR1	VALOR2	VALOR3
Coordenadas de epicentro (X,Y):	96999,522	102840,09	
CONCENTRACIÓN: 160 ppm	EFEECTO: AEGL2	ELEMENTO: Amoníaco	17619,31 m²
Población Total Promedio Afectada:	3,99	en 7 Manzanas	9690,90 m ²
INTERES AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:	2	985,60 m ²	
INTERES PUBLICO			
Elementos afectados de Hidrante:	1		
Elementos afectados de Bienestar Social:	2		
Elementos afectados de Tecnológico:	1		
Elementos afectados de Red Energía:	20		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	15		
Elementos afectados de Red Acueducto:	15		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	Puente Aranda	
UPZs	UPZs afectadas : 1	Zona Industrial	
SECTORES	Sectores afectados : 1	Gorgonzola	

- AEGL 1 (30 ppm)

A continuación se presentan en la Tabla B. 15 la afectación del AEGL 1, la cual abarca un área de 14142,41 m² en las UPZ de San Rafael y Zona Industrial, en los sectores Gorgonzola y San Francisco en la localidad de Puente Aranda. La población total afectada corresponde a 6 personas ubicadas en 7 manzanas en un área de 5807,01m². La afectación a los elementos de interés ambiental corresponde a 409,09m² de dos parques. Los elementos de interés ambiental corresponden a un hidrante, 12 elementos de la red de energía, 11 elementos de la red sanitaria y 24 elementos de la red de acueducto.

Tabla B. 15. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 1 (30 ppm).

RESULTADOS	VALOR1	VALOR2	VALOR3
Coordenadas de epicentro (X,Y):	96999,522	102840,09	
CONCENTRACIÓN: 30 ppm	EFEECTO: AEGL1	ELEMENTO: Amoniaco	14142,41 m²
Población Total Promedio Afectada:	5,24	en 7 Manzanas	5807,01 m ²
INTERES AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:	1	409,09 m ²	
INTERES PÚBLICO			
Elementos afectados de Hidrante:	1		
Elementos afectados de Red Energía:	12		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	11		
Elementos afectados de Red Acueducto:	24		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	Puente Aranda	
UPZs	UPZs afectadas : 2	Zona Industrial, San Rafael	
SECTORES	Sectores afectados : 2	Gorgonzola, San Francisco	

B. 1.2.2.2 Simulación SiDiG (Britten McQuaid) – Aplicativo SIG

Al realizar la simulación del escenario de amoniaco como emisión directa desde el tanque empleando el modelo Britten McQuaid se ingresan los datos presentados en la Tabla B. 16. La densidad es nuevamente ajustada de acuerdo a las condiciones de emisión.

Tabla B. 16. Parámetros para la simulación de una piscina de amoniaco generada por ruptura de la tubería empleando el modelo Britter-McQuaid.

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Emisión continua
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Amoniaco
Densidad característica del material de la fuente (kg/m ³)	RHO = 5,5
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	TS = 239,78
Flujo volumétrico de la fuente (m ³ /s)	QT = 2,49
Radio de la fuente (m)	R = 5,64
Parámetros Meteorológicos	
Densidad característica del aire del ambiente (kg/m ³)	RHOA = 0,9
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	UA = 1,21

Los resultados de la simulación se presentan en la Figura B. 9, junto a la concentración equivalente al AEGL 3, el cual fue la única concentración para la cual el Modelo Britter McQuaid determino el perfil de dispersión, de acuerdo a la información disponible dentro del rango de los nomogramas. Es importante tener en cuenta que esta concentración se determina para un tiempo de 10 minutos.

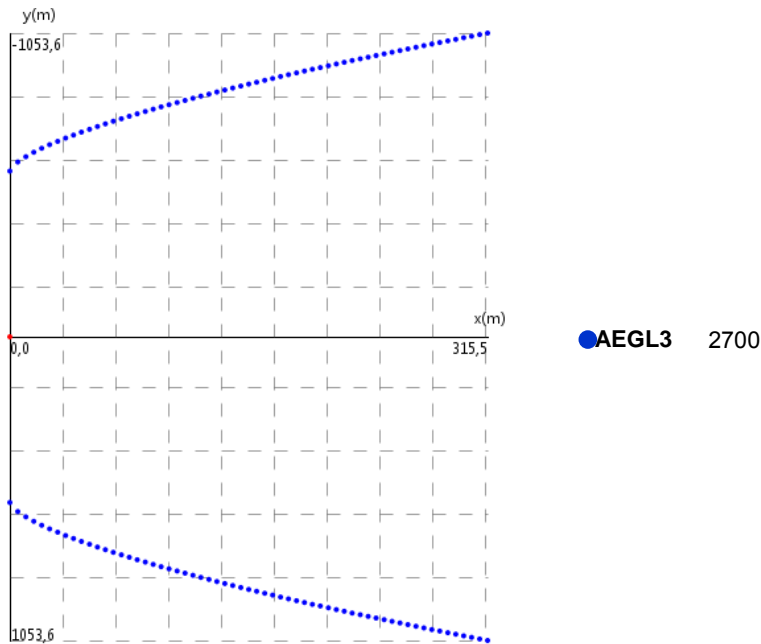


Figura B. 9. Resultados del modelo Britter - McQuaid para el escenario de amoniaco planteado como emisión directa desde el tanque (TAV= 10min).

Al emplear la herramienta *Modelo Zonas* del aplicativo SIG se obtiene la Figura B. 10 y la afectación presentada en las Tabla B. 17. Para esta concentración del AEGL 3 simulada con Britter McQuaid el área impactada es de 544008,49m², con una población de 10747 personas distribuidas en 75 manzanas. La nube tóxica obtenida por medio de esta simulación corresponde a los sectores de San Rafael Industrial, Gorgonzola, San Francisco, Colón, San Rafael, Los Ejidos y Pensilvania; a las UPZ Zona Industrial y San Rafael, y a la localidad de Puente Aranda.

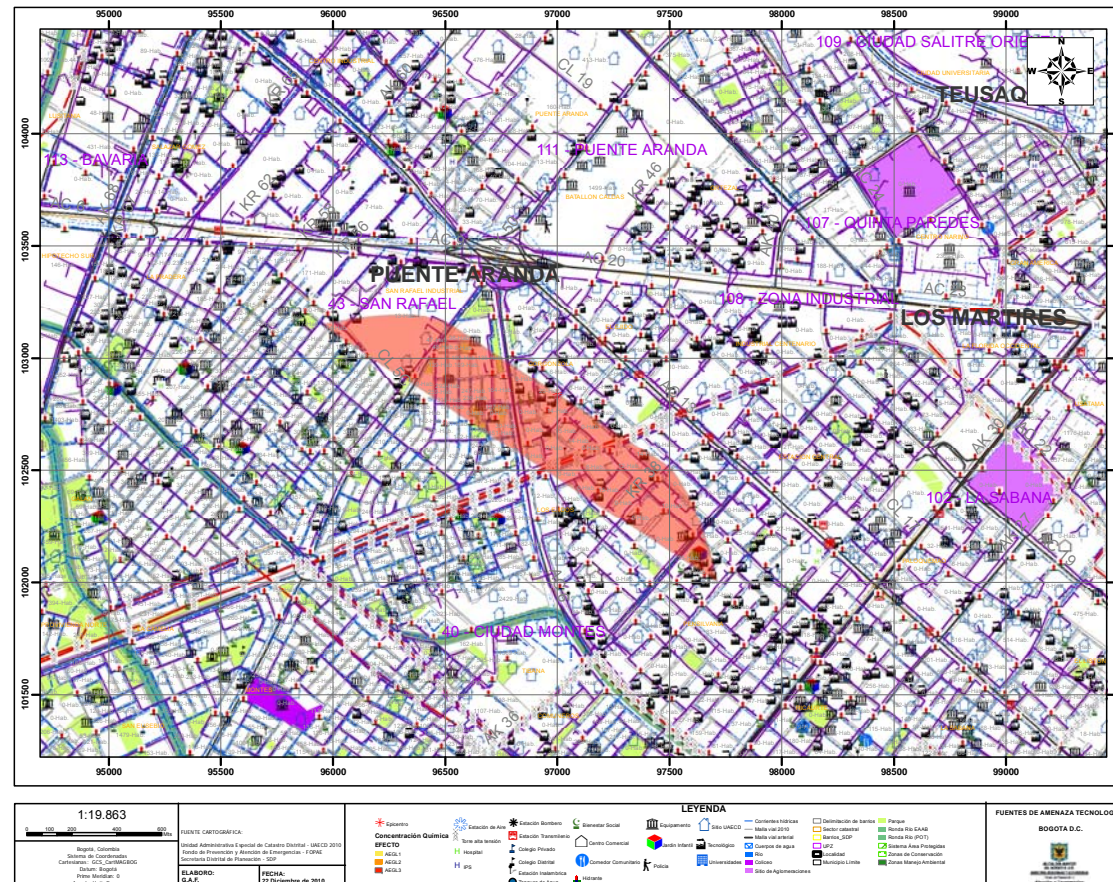


Figura B. 10. Resultados de la implementación de la dispersión de amoníaco simulada en Britter McQuaid en aplicativo SIG para el escenario de amoníaco planteado como emisión directa desde el tanque (TAV=10 min).



	<p style="text-align: center;">CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	
---	--	---

Tabla B. 17. Afectación causada por el escenario de amoniaco planteado como emisión directa del tanque simulado en Britter McQuaid en la zona de Puente Aranda.

RESULTADOS	VALOR1	VALOR2	VALOR3
COORDENADAS DE EPICENTRO (X,Y) :	96999,37	102840,718	
CONCENTRACIÓN: 2700 ppm	EFEECTO: AEGL3	ELEMENTO: Amoniaco	544008,49 m²
Población Total Promedio Afectada:	10746,38	en 75 Manzanas	157390,36 m ²
INTERES AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:	7	5825,16 m ²	
INTERES PÚBLICO			
Elementos afectados de Torre alta tensión:	2		
Elementos afectados de Hidrante:	12		
Elementos afectados de Colegio Privado:	4		
Elementos afectados de Colegio Distrital:	2		
Elementos afectados de Bienestar Social:	11		
Elementos afectados de Equipamiento:	13		
Elementos afectados de Jardín Infantil:	1		
Elementos afectados de Sitio UAEDC:	9		
Elementos afectados de Tecnológico:	14		
Elementos afectados de Red Energía:	153		
Elementos afectados de Línea Alta Tensión:	2		
Elementos afectados de Red Pluvial:	55		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	172		
Elementos afectados de Red Acueducto:	246		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	Puente Aranda	
UPZs	UPZs afectadas : 2	Zona Industrial, San Rafael	
SECTORES	Sectores afectados : 7	San Rafael Industrial, Gorgonzola, San Francisco, Colon, San Rafael, Los Ejidos, Pensilvania	

Los elementos de afectación ambiental corresponden únicamente parques distribuidos en un área de 5825,16 m². Entre los elementos de interés público se encuentran torres de alta tensión, hidrantes, colegios privados, colegios distritales, instituciones de bienestar social, elementos de equipamiento, un jardín infantil, UAECD (Unidad Administrativa de Catastro Distrital), elementos tecnológicos, de la red de energía, líneas de alta tensión, de la red pluvial y sanitaria, y de la red del acueducto.

En cuanto a los elementos de interés público es importante considerar que instituciones como los colegios distritales y públicos, jardines infantiles e instituciones de bienestar social implican la afectación sobre un mayor población que en los casos cuando estos no son afectados.

B. 1.2.2.3 Simulación en ALOHA®

Este escenario fue simulado en ALOHA® con el objetivo de comparar los resultados. Las condiciones atmosféricas, los datos de entrada y los datos de salida de la simulación se presentan en la Tabla B. 19. Los perfiles de dispersión se presentan en la Figura B. 11. El modelo empleado por ALOHA® es nuevamente Gaussiano.

Tabla B. 18. Reporte de la simulación realizada en ALOHA para el escenario de amoniaco planteado como emisión directa desde el tanque.

Condiciones atmosféricas	
Velocidad del viento (m/s)	1,21
Dirección del viento (°)	213
Altura de la medición ambiente (m)	10
Rugosidad (m)	0,03
Nubosidad (0-10)	10
Temperatura del aire (K)	280,15
Clase de estabilidad	F
Humedad (%)	70
Propiedades de la fuente (Parámetros de entrada)	
Fuente	Piscina (Puddle)
Área de la piscina (m ²)	100
Total masa de la piscina (kg)	8225
Tipo de suelo	Concreto
Temperatura del suelo (K)	Usar la temperatura del aire si no es conocida (K)
Temperatura inicial de la piscina (K)	239,72
No hay inversión	
Propiedades fuente (Parámetros de salida)	
Duración de la emisión (h)	1 (Limitada por ALOHA)
Máxima tasa de liberación (lb/min)	218
Total cantidad emitida (lb)	3157
Total cantidad emitida (kg)	1420

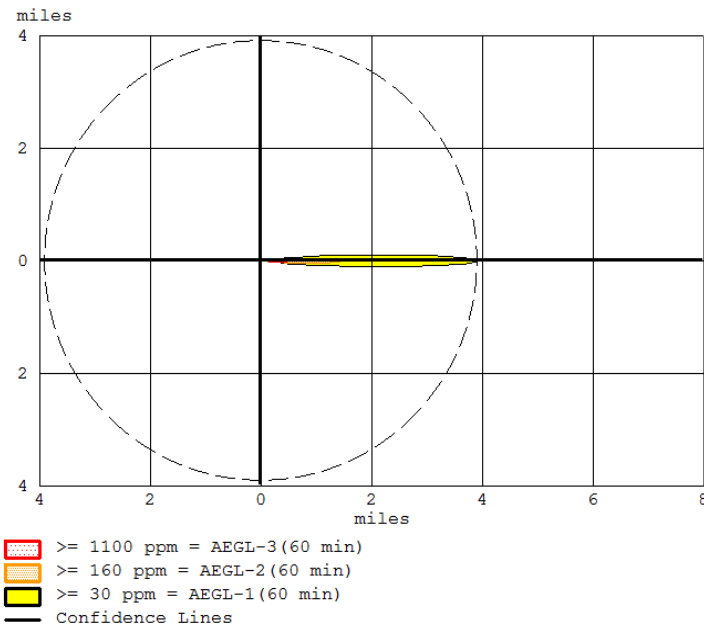


Figura B. 11. Simulación realizada en ALOHA para el escenario de amoníaco para el escenario planteado como emisión directa desde el tanque.

B. 1.2.2.4 Comparación de resultados

En esta sección se presentan las distancias seguras obtenidas empleando los diferentes modelos de simulación de dispersión. Teniendo en cuenta que la tasa de liberación del tanque es mayor que la presentada en el anterior escenario, estos valores se comparan tanto con los valores reportados por la GRE para emisiones pequeñas como para emisiones grandes.

La Tabla B. 19 presenta los resultados obtenidos para un tiempo de 60 minutos con el modelo SLAB y empleando el programa ALOHA®. Estos resultados proveen una distancia segura mayor que la propuesta por la GRE para emisiones pequeñas, pero menor que la propuesta para emisiones grandes. Este resultado se obtiene puesto que la emisión es mayor que la contemplada para una emisión pequeña, pero no es tan grande como para ser considerada una emisión grande.

Tabla B. 19. Resultados de las simulaciones en ALOHA® y programa SLAB, comparadas con la GRE (Escenario de emisión directa del tanque) – TAV= 60 min.

	ALOHA (m)	SLAB (m)	GRE Emisión pequeña (m)	GRE (m) Emisión grande (m)
AEGL1 (30ppm)	6280	268	200	2300
AEGL2 (160ppm)	2410	234	-	-
AEGL3 (1100 ppm)	890	178	-	-

Los resultados obtenidos para un tiempo de 10 minutos se presentan en la Tabla B. 20. Estos resultados al igual que los anteriores se encuentran por encima del valor propuesto por la GRE para emisiones pequeñas. Estos resultados son consistentes con la magnitud de la emisión.

Tabla B. 20. Resultados de las simulaciones SLAB y el programa Britter McQuaid, comparadas con la GRE – TAV= 10 min.⁴⁵

	SLAB (m)	Britter McQuaid (m)	GRE Emisión pequeña (m)	GRE Emisión grande (m)
AEGL1 (30ppm)	268	315,5	200	2300
AEGL2 (220ppm)	224,6	-	-	-
AEGL3 (2700 ppm)	156,6	-	-	-

Adicionalmente se recomienda consultar la sección B. 1.2.4.5 para una mejor interpretación de los resultados.

B. 1.3 Liberación de acuerdo al tipo de falla

Con el objetivo de proporcionar una guía más completa sobre las tasas de liberación esperadas en la industria para los accidentes de amoniaco, se presenta a continuación en la Tabla B. 21 algunos casos comunes de emisión. Sin embargo, estos valores deben ser estudiados y empleados cuidadosamente puesto que las condiciones de emisión dependen de diferentes variables, desde el tipo de agujero hasta la geometría específica del contenedor. Los valores aquí presentados pretenden dar un estimativo del orden de magnitud esperado en caso de presentarse una fuga similar.

⁴⁵ Se presentan los resultados de la simulación realizada con el modelo SLAB pero para un tiempo para promediar la concentración (TAV) de 10 minutos, de tal forma que se pueda comparar con el modelo Britter McQuaid. Sin embargo, para estos resultados de SLAB no se presentó la afectación.

Tabla B. 21. Tasas de liberación esperada en la industria de amoniaco para diferente tipo de contenedores.

Condiciones de almacenamiento	Tipos de envases	Tipo de falla	Tamaño del agujero (m ²)	Tasa de pérdida (kg/s)
Presurizado a temperatura ambiente T=20°C P=100psig	Cilindro horizontal (10 Ton)	Fuga en la sección líquida	0,01	291,94
			0,001	29,71
			0,0001	2,93
		Fuga en la sección gaseosa	0,01	14,05
			0,001	1,43
			0,0001	0,14
	Fuga en la sección líquida a más de 10 cm del tanque	0,01	8,48	
		0,001	0,84	
		0,0001	0,084	
	Cilindro mediano (360 kg)	Fuga en la sección líquida	0,01	291
			0,001	29,6
			0,0001	2,91
		Fuga en la sección gaseosa	0,01	14,05
			0,001	1,43
			0,0001	0,137
		Fuga en la sección líquida a más de 10 cm del tanque	0,01	8,48
			0,001	0,85
			0,0001	0,084

B. 2 CLORO (Cl₂)

El cloro es un gas tóxico asfixiante de color amarillo verdoso, el cual reacciona con la mayoría de los elementos. Este compuesto es empleado en la manufactura de productos de limpieza y productos textiles. El cloro una sustancia irritante y corrosiva, además es altamente reactivo con compuestos orgánicos e inorgánicos y puede causar explosiones e incendios (Nitrox, 2007).

A continuación se presentan las condiciones de almacenamiento más comunes. Esta información fue tomada del (Mannan, 2005).

B. 2.1 Almacenamiento cloro

El cloro, al igual que el amoniaco, se almacena usualmente presurizado a temperatura ambiente; sin embargo, este puede almacenarse totalmente refrigerado, a una temperatura de -34°C (punto de ebullición a una atmósfera) y presión atmosférica.

El almacenamiento de cloro líquido se presenta usualmente en las instalaciones de trabajos químicos, donde es requerido para tratamiento de agua, estaciones energéticas y piscinas.

Esta sustancia solo debe ser almacenada en grandes cantidades si el uso de tambores o bidones no es práctico. Para garantizar las condiciones de seguridad, lo mejor es mantener el menor número de tanques, de esta forma disminuye la probabilidad de derrame. Sin embargo, para proveer continuidad y la flexibilidad usualmente se cuenta con mínimo dos tanques. Por otro lado, los contenedores estacionarios de cloro deberían tener una capacidad mayor que una carga completa de un carro tanque.

El almacenamiento de gas licuado se diseña, fabrica, inspecciona y mantiene de tal forma que no haya posibilidad de derrame cuando este esté almacenado bajo estas condiciones. Los almacenamientos de gas licuado pueden ser ubicados de tal manera que puedan ser protegidos del daño externo.

Los factores críticos para prevenir escapes son: arreglos para asilamiento de otros equipos, protección contra daño externo, medios para mantener las condiciones de diseño y aliviar situaciones extrañas, medios para disposición de purgas, medios para la retención de derrames y para su tratamiento (con capacidad para un derrame serio pero razonable). Las paredes del área de retención deben ser suficientes también para retener el material usado para prevenir el derrame.

- Materiales de construcción

El material de construcción de los tanques es acero dulce. Este acero es suficiente para el manejo de gases secos o cloro líquido, pero no para cloro húmedo. Adicionalmente, es importante respetar los límites de temperatura para este acero.

- Tanques de almacenamiento

Los tanques presurizados son usualmente cilindros horizontales para las capacidades menores y esféricos para las capacidades más altas. Tanques de almacenamiento hasta 400 t han sido usados para cloro. Tanques de mayor capacidad han sido sacados de inventario.

Los tanques de almacenamiento de cloro deben tener un mínimo de presión de diseño de 174psig (12 barg) y la mínima temperatura de diseño debe ser de -35°C. Las temperaturas de diseño se encuentran entre -35°C y 45°C.

El radio de llenado es normalmente 1.25 kg de líquido/litro de capacidad, lo cual garantiza que inclusive a 50°C el volumen no va a exceder 95% de capacidad.

Las conexiones en un tanque de almacenamiento de cloro deben ser mínimas y simples. Se contempla una entrada líquida, una salida líquida, una línea de venteo, un sistema de alivio y las conexiones. Las conexiones en la parte líquida deben evitarse, de tal forma que si se presenta una fuga sea desde el gas. La línea de venteo debe estar conectada a un sistema de absorción.

Los contenedores de cloro deben estar localizados sobre el suelo y tener un dique alrededor. El dique debe ser capaz de almacenar el contenido del mayor tanque. El suelo debajo del tanque debe ser inclinado para permitir el drenaje en un sumidero.

- Instalaciones auxiliares:

Incluye un tanque de expansión, para contener el cloro venteado en caso de un sobrellenado; equipo para la transferencia de líquido, para el consumo de la planta; equipo para vaporización cuando sea necesario cloro gaseoso.

- Instrumentación

La instrumentación necesaria para el almacenamiento de cloro incluye medición y alarmas en el líquido, presión y temperatura. La protección contra el sobrellenado debe tener atención particular. Debe existir una alarma de alto contenido y extra

alto contenido, y una de bajo contenido también es apropiada. El sitio debe contar un detector de cloro gaseoso.

La liberación de presión debe ser la última medida de seguridad, junto a las válvulas de aislamiento. Un contenedor de expansión puede ser proporcionado para recibir la liberación, este se debe diseñar con la misma capacidad de los tanques de almacenamiento.

B. 2.2 Escenarios de cloro

Para el planteamiento de los escenarios de cloro se contemplaron los tamaños más comunes de almacenamiento del material, y entre estos aquellos que han presentado algún tipo de falla. El primer escenario planteado corresponde a una fuga en un cilindro de cloro licuado de 68 kg, con un daño en la válvula; es decir, la fuga se presenta en la parte superior del cilindro, permitiendo el escape del material como gas. El segundo escenario fue planteado como una fuga de gas en un tanque de 1 t. Se presentan a continuación tanto las condiciones de almacenamiento como las condiciones atmosféricas empleadas en las simulaciones.

Condiciones de almacenamiento:

- Capacidad de almacenamiento del cilindro: 68 kg
- Diámetro de la válvula: $\frac{3}{4}$ de pulgada (0,0208m)
- Porcentaje de llenado del tanque: 80 %
- Volumen del cilindro de 68 kg: $0,054\text{m}^3$.
- Volumen del cilindro de 1t: $0,79\text{m}^3$.
- Presión de almacenamiento: 120 psig.

Condiciones atmosféricas:

La implementación de las coordenadas y condiciones atmosféricas de los modelos en el distrito se realizó teniendo como base un accidente reportado en una chatarrería. El escenario de este accidente fue la Cr 22 # 166 – 52. Considerando los polígonos de Thiessen, la estación climatológica correspondiente a este escenario fue la de Usaquén. Las condiciones climatológicas en este punto se presentan a continuación:

- Velocidad del viento promedio: 0,965 m/s
- Dirección del viento: 120° (Sur este – SE)

Los demás parámetros atmosféricos seleccionados son:

- Humedad relativa: 70%
- Temperatura ambiente: 7°C (temperatura mínima promedio para Bogotá, esta condición genera el escenario crítico de dispersión de gases).

Al igual que para los escenarios de amoníaco se asume un escenario no confinado y se emplean los Niveles de Exposición Aguda (AEGLs), estos valores se presentan en la Tabla B. 22.

Tabla B. 22. Concentraciones de los AEGLs para cloro.

	10 min	30 min	60 min	4h	8h
AEGL1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
AEGL2	2,8	2,8	2	1	0,71
AEGL3	50	28	20	10	7,1

Se presenta en los siguientes numerales la memoria de cálculo y el proceso de simulación para el primer escenario planeado, y los resultados de simulación para el segundo escenario.

B. 2.2.1 ESCENARIO 1: Daño en la válvula en un cilindro de 68 kg

B. 2.2.1.1 Memoria de cálculo

El cilindro de Cl₂ considerado para este escenario almacena 68 kg de cloro líquido, ocupando un 80% del volumen del cilindro. El cloro a condiciones ambiente se presenta como gas, por tal motivo para el almacenamiento a temperatura ambiente este se encuentra como líquido comprimido. A continuación se presentan las condiciones de equilibrio termodinámico en una Figura de temperatura contra presión de vapor.

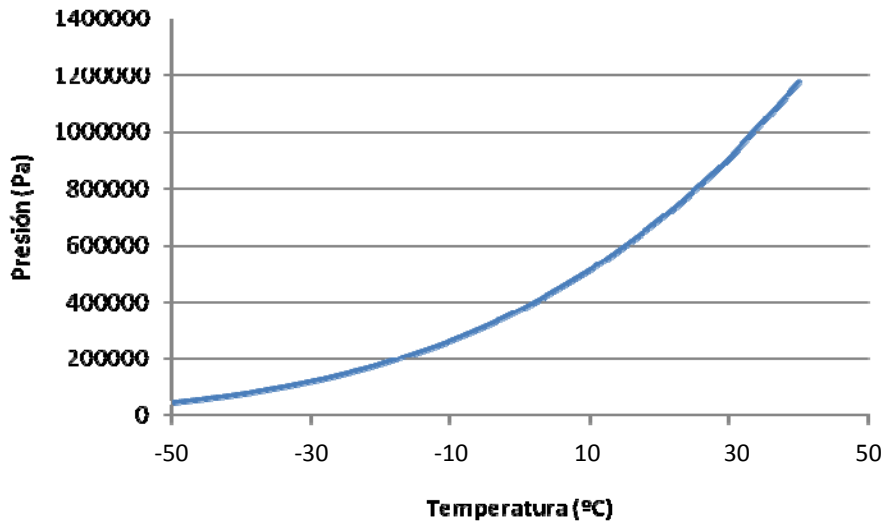


Figura B. 12 . Condiciones de equilibrio T(°C) vs P(Pa) para el Cl₂.

Estas condiciones de equilibrio pueden ser representadas además por la Ecuación B. 11.

$$P(\text{mmHg}) = 10^{7,58743 - \frac{1013,78}{(T(^{\circ}\text{C}) + 248,825)}} \quad \text{Ecuación B. 13}$$

Teniendo en cuenta que el Cl₂ se encuentra almacenado a una presión de 120psig (827.371 Pa), la temperatura del equilibrio correspondería de acuerdo a la Ecuación B. 12 a 26,43°C. El cilindro se encuentra almacenado a temperatura ambiente, es decir aproximadamente a 13,5°C, y la temperatura en equilibrio con la presión de 120psi es mayor. De esta forma se puede asumir que el cloro se encuentra como líquido.

A pesar que el Cl₂ está almacenado como líquido, en el escenario contemplado la fuga es en fase gaseosa. Al presentarse el daño o apertura de la válvula, se puede asumir que el líquido se despresuriza y la liberación se da en fase gaseosa.

A continuación se presenta el procedimiento para determinar la tasa de liberación. Para este cálculo se asumió que inicialmente se da la liberación de gas a la máxima tasa de liberación (el volumen considerado corresponde al volumen del cilindro). Teniendo en cuenta que la tasa de emisión disminuye a medida que el cilindro se vacía, se asumió posteriormente la tasa de emisión como piscina dentro del cilindro. El tiempo total de emisión se consideró de 1 minuto.

Paso 1: Cálculo el área de la fuga (Ecuacion B.4)

$$A = \pi * r^2 \quad \text{Ecuación B. 4}$$

$$A = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$A = \pi * \left(\frac{0,0208m}{2}\right)^2$$

$$A = 0,00034 m^2$$

Paso 2: Cálculo de la masa de gas contenida en el cilindro

Para este cálculo se emplea la ecuación de gases ideales.

$$PV = nRT \quad \text{Ecuación B. 14}$$

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{827371Pa * 0,054m^3}{8,314 \frac{m^3 * Pa}{mol * K} * (13,5 + 273,15)K} = 18,74mol$$

$$m = n * pm = 18,74mol * 70,9 \frac{g}{mol} = 1,329kg$$

Paso 3: Determinar la tasa de liberación del gas

Para determinar la tasa de flujo másico con la cual el gas es liberado del cilindro a través de la válvula se emplea el modelo fuente "Flujo de vapor a través de agujeros" (Sección 7.3.6.2. a). Teniendo en cuenta que se desea conocer las condiciones críticas, se emplea la ecuación de máximo flujo, la cual se presenta a continuación:

$$Q_{m(Choque)} = C_0 AP_0 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_0} \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad \text{Ecuación B. 15}$$

Para el cloro bajo estas condiciones se determinan las propiedades presentadas en la Tabla B. 23.

Tabla B. 23. Propiedades físicas y termodinámicas del cloro.

T_b (°C) ^a	ΔH_v (kJ/mol) ^b	M (kg/kmol)	γ
-34,06	20,4	70,9	1,33

Se asume un C_0 igual a 1, teniendo en cuenta el objetivo de alcanzar la mayor tasa de liberación que podría presentarse. Y los valores empleados para R_g y g_c son:

$$R_g = 8,314 \frac{m^3 Pa}{mol \cdot K}$$

$$g_c = \frac{1kg \cdot m}{s^2 N}$$

Al igual que para el escenario de amoniaco, se pretende plantear un escenario crítico de cloro. Para esto se considera la máxima temperatura ambiente del Distrito Capital, 20°C. Esto favorece la transferencia de masa de la sustancia tóxica a la atmósfera.

Reemplazando:

$$Q_{m(Choque)} = C_0 A P_0 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_0} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}}$$

$$Q_{m(Choque)} = 1 * 0,00034 m^2 * 827371 Pa \sqrt{\frac{1,33 * \frac{1kg \cdot m}{s^2 N} * \frac{70,9kg}{kmol} * \frac{kmol}{1000mol}}{8,314 \frac{m^3 Pa}{mol \cdot K} * (273,15 + 20)K} \left(\frac{2}{1,33 + 1} \right)^{\frac{1,33 + 1}{1,33 - 1}}}$$

$$Q_{m(Choque)} = 1,15 kg / s$$

Paso 4: Determinar el tiempo de vaciado del cilindro

$$t = \frac{m}{Q_m}$$

Ecuación B. 16

$$t = \frac{1,33kg}{1,15kg / s}$$

$$t = 1,15s$$

Paso 5: Cálculo de la tasa de emisión empleando el modelo de piscina

El modelo piscina se asumió teniendo en cuenta que dentro del cilindro se presenta una superficie de intercambio de materia, esta superficie corresponde al líquido que se encuentra contenido dentro del cilindro y que aún no se ha evaporado. Teniendo en cuenta que al igual que una piscina, la superficie del líquido dentro del cilindro tiene la presión de vapor de la sustancia a la temperatura ambiente, se realiza el supuesto de piscina de evaporación para calcular la tasa de emisión.

$$Q_m = \frac{MKAP^{sat}}{R_g T_L} \quad \text{Ecuación B. 17}$$

$$Q_m = \frac{MKAP^{sat}}{R_g T_L} = 0,00004kg / s$$

Paso 6: Tasa de emisión promedio

$$Q_{m-promedio} = 1,15 \frac{kg}{s} * \frac{1,15s}{60s} + 0,00004 \frac{kg}{s} * \left(\frac{60s - 1,15s}{60} \right) = 0,022 \frac{kg}{s}$$

Adicionalmente se deben determinar dos parámetros necesarios para el modelo SLAB, los cuales son el área y la temperatura de la fuente.

Paso 7: Cálculo de la temperatura del material de la fuente

Cuando el material es almacenado como vapor se emplea la siguiente relación (Sección 7.3.4):

$$TS = \left(\frac{1}{\gamma} \right) \left(1 + (\gamma - 1) \frac{P_a}{P_{Almacenamiento}} \right) T_0 \quad \text{Ecuación B. 18}$$

$$TS = \left(\frac{1}{1,33} \right) \left(1 + (1,33 - 1) \frac{14,7psi}{120psig + 14,7psi} \right) (273,15 + 20)K = 228,3K$$

Cuando la temperatura es menor a la temperatura del punto de ebullición a una atmósfera, se ajusta a este valor, el cual corresponde para este caso a 239,09K.

Paso 8: Cálculo del área de la fuente

$$A = \frac{P_{\text{almacenamiento}}}{P_a} \frac{TS}{T_0} A_{\text{liberación}} \quad \text{Ecuación B. 19}$$

$$A = \frac{120 \text{ psig} + 14,7 \text{ psi}}{14,7 \text{ psi}} \frac{239 \text{ K}}{(273,15 + 20) \text{ K}} 0,00034 \text{ m}^2$$

$$A = 0,0025$$

Paso 9: Cálculo de la fracción de vapor de la sustancia

De acuerdo a la Ecuación B.11, la fracción de vapor se calcula de la siguiente manera:

$$f_v = \frac{m_v}{m} = \frac{C_p (T_0 - T_b)}{\Delta H_v} \quad \text{Ecuación B. 11}$$

$$f_v = \frac{4294 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 70,9 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{\text{kg}}{1000 \text{g}} * (293,15 \text{ K} - 239,06 \text{ K})}{20,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}$$

$$f_v = 0,81$$

$$f_L = 1 - f_v$$

$$f_L = 1 - 0,81_v$$

$$f_L = 0,19 = \text{CMEDO}$$

B. 2.2.1.2 Simulación SiDiG (SLAB) – Aplicativo SIG

La Tabla B. 24 presenta los datos de entrada al modelo empleando el modelo SLAB del programa SiDiG.

Tabla B. 24. Parámetros de entrada al modelo SLAB para el escenario de cloro planteado como fuga en la válvula del cilindro de 68kg.

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Emisión de un jet horizontal
Parámetro del subpaso numérico	NCALC = 1
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Cloro
Peso molecular del material de la fuente (kg)	WMS = 0.070906
Capacidad calorífica del vapor a presión constante (J/kg K)	CPS = 498.1
Temperatura del punto de ebullición (K)	TBP = 239.10
Fracción másica del líquido inicial	CMEDO = 0.1941
Calor de vaporización (J/kg)	DHE = 287840
Capacidad calorífica del líquido (J/kg K)	CPSL = 926.3
Densidad del líquido del material de la fuente (kg/m ³)	RHOSL = 1574
Primera constante de la presión de saturación	SPB = 1978.34
Segunda constante de la presión de saturación (K)	SPC = -27.01
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	TS = 239.01
Flujo másico de la fuente (kg/s)	QS = 0.022
Área de la fuente (m ²)	AS = 0.002
Duración de la fuente continua (s)	TSD = 60
Masa de la fuente instantánea (kg)	QTIS = 0
Altura de la fuente (m)	HS = 0
Parámetros del Campo	
Tiempo para promediar la concentración (min)	TAV = 60
Distancia máxima en la dirección del viento (m)	XFFM = 10000 ⁴⁶
Alturas del cálculo de concentración (m)	ZP= 0
Parámetros Meteorológicos	
Altura de la rugosidad de la superficie (m)	ZO = 0.03
Altura de la medición del ambiente (m)	ZA = 10
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	UA = 0.965
Temperatura del ambiente (K)	TA = 280.15
Humedad relativa (%)	RH = 70
Valores de la clase de estabilidad	STAB = F

Los resultados obtenidos a partir de esta simulación se presentan en la Figura B. 13.

⁴⁶ La selección de este parámetro corresponde a lo enunciado en el manual del SiDiG A 1.5.5.1.

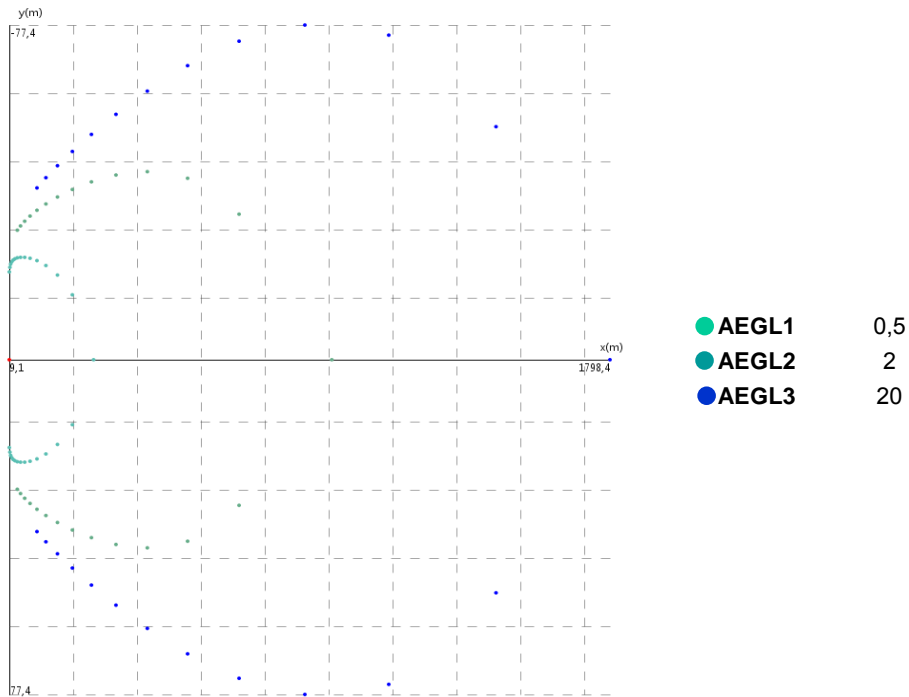


Figura B. 13. Resultados del modelo SLAB para el escenario de cloro planteado como fuga en la válvula del cilindro de 68kg (TAV= 60 min).

Estos resultados fueron cargados al aplicativo Modelo Zonas para SIG, considerando el epicentro propuesto anteriormente, estos se presentan en la Figura B. 14. Los resultados de la afectación sobre el distrito se presentan en la Tabla B. 25, Tabla B. 26 y Tabla B. 27.

- AEGL 3 (20 ppm)

La Tabla B. 25 se presenta la afectación causada por el AEGL 3 (20 ppm). La región comprendida tiene un área de 7133,98 m², afectando a una población de 211 habitantes. Los elementos de interés público son: hidrantes, elementos de la red de energía, pluvial y sanitaria. En la superposición de este escenario se puede observar que no existe una institución de que congregue un gran número de población. Sin embargo, teniendo en cuenta el tamaño de la nube tóxica la población involucrada es mayor que para el escenario de amoníaco. Esta emisión comprende el sector de El Toberín, está ubicada en la UPZ Toberín, en la localidad de Usaquén.



Tabla B. 25. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 3 (20 ppm).⁴⁷

RESULTADOS	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
COORDENADAS DE EPICENTRO (X,Y) :	103543,334	116699,257	
CONCENTRACIÓN: 20 ppm	EFEECTO: AEGL3	ELEMENTO: Cloro	7133,98 m²
Población Total Promedio Afectada:	210,44	en 4 Manzanas	3792,02 m ²
INTERES PÚBLICO			
Elementos afectados de Hidrante:	1		
Elementos afectados de Red Energía:	10		
Elementos afectados de Red Pluvial:	4		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	6		
CATASTRO BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	USAQUEN	
UPZs	UPZs afectadas : 1	TOBERIN	
SECTORES	Sectores afectados : 1	EL TOBERIN	

- AEGL 2 (2 ppm)

El AEGL 2 tiene un efecto sobre una población de 574 habitantes, distribuidos en 11 manzanas. El área total involucrada por el AEGL 2 (2 ppm) es de 39969,19 m². Los elementos de interés ambiental impactados corresponden a dos parques con un área de 5999,11m². Los elementos de interés público son hidrantes, elementos de interés tecnológico, de la red de energía, de la red pluvial y la red sanitaria. Al igual que el AEGL 3, no existe ninguna afectación sobre elementos de interés

⁴⁷ Para el caso del cloro y otras sustancias explosivas es importante analizar los elementos de interés público en términos de explosiones.

	<p style="text-align: center;">CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	
---	--	---

público relacionados con alta afluencia de población. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la exposición de infraestructura o servicios como el de la red pluvial y sanitaria pueden generar una exposición indirecta de la población a el compuesto o a compuestos obtenidos a partir de reacciones químicas.



Tabla B. 26. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 2 (2 ppm).⁴⁸

RESULTADOS	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
COORDENADAS DE EPICENTRO (X,Y) :	103543,334	116699,257	
CONCENTRACIÓN: 2 ppm	EFEECTO: AEGL2	ELEMENTO: Cloro	39969,19 m²
Poblacion Total Promedio Afectada:	573,69	en 11 Manzanas	33334,35 m ²
INTERES AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:	2		5992,11 m2
INTERES PÚBLICO			
Elementos afectados de Hidrante:	2		
Elementos afectados de Tecnológico:	1		
Elementos afectados de Red Energía:	23		
Elementos afectados de Red Pluvial:	8		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	19		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	USAQUEN	
UPZs	UPZs afectadas : 1	TOBERIN	
SECTORES,	Sectores afectados : 1	EL TOBERIN	

- AEGL 1 (30 ppm)

Para el AEGL 1 (30 ppm) el efecto originado es sobre un área de 128744,21m². Impactando 3235 personas ubicadas en 35 manzanas. Esta región se encuentra ubicada en los sectores de El Toberin, La Pradera Norte, Las Orquídeas y San Cristóbal Norte, en las UPZs de San Cristóbal Norte y Toberin, en el barrio de Villa Olivia en Usaquén. En cuanto a los elementos de interés ambiental se encuentran

⁴⁸ Para el caso del cloro y otras sustancias explosivas es importante analizar los elementos de interés público en términos de explosiones.

	<p style="text-align: center;">CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	
---	--	---



3 parques (7263,14 m²), una ronda de río (6573,54 m²) y una zona de manejo ambiental (6535,5m²). Elementos como los parques pueden aumentar la afectación a la población dependiendo de la hora de la emisión y la concordancia con las horas de mayor confluencia a los parques.

Entre los elementos de interés público se encuentran una IPS, hidrantes, colegios distritales, institutos de Bienestar Social, UAECD, redes pluviales y redes sanitarias. De acuerdo a las características de estos elementos la afectación en población variará, como es el caso de los colegios o los institutos de Bienestar Social.

Tabla B. 27. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 1 (0,5 ppm).⁴⁹

RESULTADOS	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
COORDENADAS DE EPICENTRO (X,Y) :	103543,334	116699,257	
CONCENTRACIÓN: 0,5	EFEECTO: AEGL1	ELEMENTO: Cloro	128744,21 m²
Población Total Promedio Afectada:	3235,19	en 35 Manzanas	99566,77 m2
INTERES AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:	3	7263,14 m ²	
Elementos afectados de Ronda Río (POT):	1	6573,54 m ²	
Elementos afectados de Zonas Manejo Ambiental:	1	6535,50 m ²	
INTERES PÚBLICO			
Elementos afectados de IPS:	1		
Elementos afectados de Hidrante:	2		
Elementos afectados de Colegio Distrital:	1		
Elementos afectados de Estación Inalámbrica:	1		
Elementos afectados de Bienestar Social:	4		
Elementos afectados de Equipamiento:	2		
Elementos afectados de Sitio UAECD:	3		
Elementos afectados de	3		

⁴⁹ Para el caso del cloro y otras sustancias explosivas es importante analizar los elementos de interés público en términos de explosiones.

	<p style="text-align: center;">CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	
---	--	---

Tecnológico:			
Elementos afectados de Red Energía:	68		
Elementos afectados de Línea Alta Tensión:	1		
Elementos afectados de Red Pluvial:	39		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	65		
Elementos afectados de Red Acueducto:	29		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	USAQUEN	
BARRIOS	Barrios afectados : 1	VILLA OLIVA	
UPZs	UPZs afectadas : 2	SAN CRISTOBAL NORTE,TOBERIN	
SECTORES	Sectores afectados : 4	EL TOBERIN,LA PRADERA NORTE,LAS ORQUIDEAS,SAN CRISTOBAL NORTE	

B. 2.2.1.3 Simulación SiDiG (Britter McQuaid)

Al emplear el modelo Britter McQuaid para la simulación de este escenario de cloro no se obtienen perfiles de dispersión. Este resultado se presenta debido a que Britter McQuaid es un modelo experimental y las concentraciones evaluadas se encuentran fuera del rango de aplicación del modelo. Estas concentraciones corresponden a los valores de los AEGLs para un tiempo de 10 minutos (Tabla B.22), tiempo para el cual se encuentran disponibles los nomogramas del modelo Britter McQuaid.

B. 2.2.1.4 Simulación en ALOHA®

La emisión de cloro desde el cilindro de 68 kg fue simulada en ALOHA®. La Tabla B. 28 presenta tanto las condiciones de entrada como las de salida al programa. En esta ocasión el modelo empleado por el programa ALOHA® fue Gas Denso (Heavy Gas, por su nombre en inglés). En la Figura B. 15 se presentan los perfiles de dispersión calculados por el programa.

Tabla B. 28. Reporte de la simulación realizada en ALOHA para el escenario de cloro planteado como fuga del cilindro de 68 kg.

Condiciones atmosféricas	
Velocidad del viento (m/s)	1
Dirección del viento (°)	120
Altura de la medición ambiente (m)	10
Rugosidad (m)	0,03
Nubosidad (0-10)	10
Temperatura del aire (K)	280,15
Clase de estabilidad	F
No hay inversión	
Humedad (%)	70
Propiedades de la fuente (Parámetros de entrada)	
Fuente	Directa - Continua
Tasa de liberación (kg/s)	0,022
Tiempo de liberación (min)	1
Altura de la fuente (m)	0
Propiedades fuente (Parámetros de salida)	
Total cantidad emitida (lb)	3,44
Total cantidad emitida (kg)	1,56

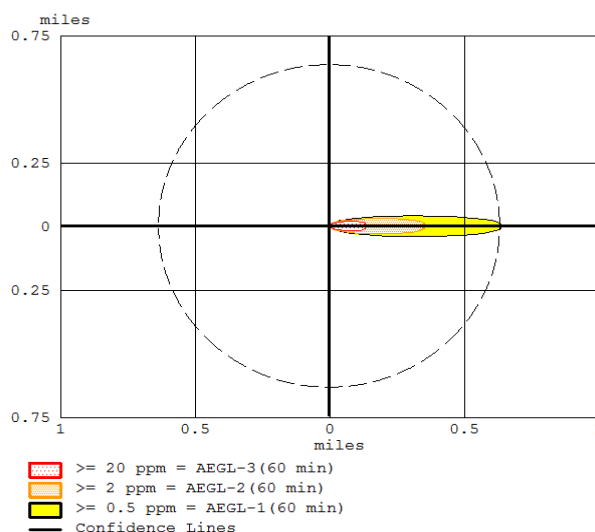


Figura B. 15. Simulación realizada en ALOHA para el escenario de cloro planteado como emisión de un cilindro de 68 kg.

B. 2.2.1.5 Comparación de resultados

En la Tabla B. 29 se pueden observar las distancias seguras obtenidas por el programa ALOHA® y el modelo SLAB, comparados con la GRE para emisiones

pequeñas durante la noche, las cuales coinciden con las características alimentadas a los modelos. Los resultados obtenidos son comparables y se encuentran dentro del mismo orden de magnitud.

Tabla B. 29. Resultados de las simulaciones en ALOHA® y programa SLAB, comparadas con la GRE (Escenario de emisión cilindro 68 kg) – TAV= 60min.

	ALOHA (m)	SLAB (m)	GRE (m)
AEGL1 (0,5 ppm)	1020	1798	1600
AEGL2 (2 ppm)	570	969	-
AEGL3 (20ppm)	210	260	-

Se recomienda consultar la sección B. 1.2.4.5 para una mejor interpretación de los resultados.

B. 2.2.2 ESCENARIO 2: Daño en la válvula en un tanque de 1 t

B. 2.2.2.1 Simulación SiDiG (SLAB) – Aplicativo SIG

Para el segundo escenario de cloro planteado se presentan los parámetros de entrada al modelo SLAB en la Tabla B. 30, y los perfiles de dispersión en la Figura B. 16.

Tabla B. 30. Parámetros de entrada al modelo SLAB para el escenario de cloro planteado como fuga en un tanque de 1t.

Tipo de fuente	
Tipo de derrame	Emisión de un jet horizontal
Parámetro del subpaso numérico	NCALC = 1
Propiedades de la fuente	
Nombre del químico	Cloro
Peso molecular del material de la fuente (kg)	WMS = 0.070906
Capacidad calorífica del vapor a presión constante (J/kg K)	CPS = 498.1
Temperatura del punto de ebullición (K)	TBP = 239.10
Fracción másica del líquido inicial	CMEDO = 0.1941
Calor de vaporización (J/kg)	DHE = 287840
Capacidad calorífica del líquido (J/kg K)	CPSL = 926.3
Densidad del líquido del material de la fuente (kg/m ³)	RHOSL = 1574
Primera constante de la presión de saturación	SPB = 1978.34
Segunda constante de la presión de saturación (K)	SPC = -27.01
Parámetros del derrame	
Temperatura del material de la fuente (K)	TS = 239.01
Flujo másico de la fuente (kg/s)	QS = 0.12
Área de la fuente (m ²)	AS = 0.002
Duración de la fuente continua (s)	TSD = 60
Masa de la fuente instantánea (kg)	QTIS = 0
Altura de la fuente (m)	HS = 0
Parámetros del Campo	
Tiempo para promediar la concentración (min)	TAV = 60
Distancia máxima en la dirección del viento (m)	XFFM = 10000
Alturas del cálculo de concentración (m)	ZP= 0
Parámetros Meteorológicos	
Altura de la rugosidad de la superficie (m)	ZO = 0.03
Altura de la medición del ambiente (m)	ZA = 10
Velocidad del viento del ambiente (m/s)	UA = 0.965
Temperatura del ambiente (K)	TA = 280.15
Humedad relativa (%)	RH = 70
Valores de la clase de estabilidad	STAB = F

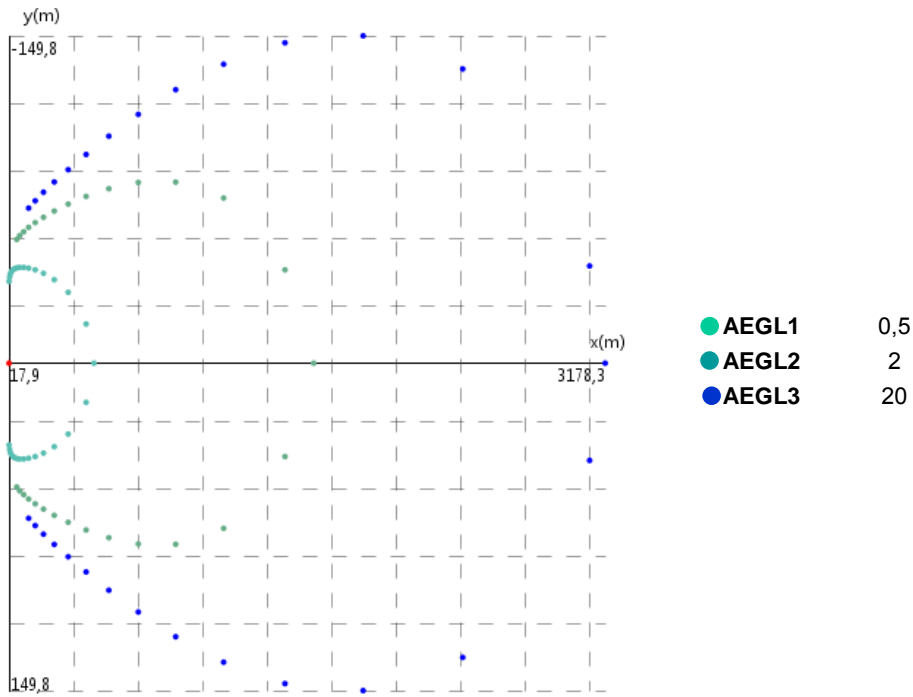


Figura B. 16. Resultados del modelo SLAB para el escenario de cloro planteado como fuga en un tanque de 1t (TAV= 60min).

Estos resultados fueron implementados en el aplicativo SIG, y los resultados de la superposición se presentan en la Figura B. 17, y en las Tabla B. 31, Tabla B. 32 y Tabla B. 33.

- AEGL 3 (20 ppm)

La afectación producida por el AEGL 3 calculado para el Escenario 2 de cloro se presenta en la Tabla B. 31. La región abarcada por el AEGL 3 corresponde a 30930,38 m², afectando una población de 391 personas distribuidas en ocho manzanas. La nube tóxica contemplada se encuentra ubicada en el sector de Toberín, en la UPZ de Toberín y en la localidad de Usaquén. El elemento de interés ambiental corresponde a 4554,66 m² de un parque. En cuanto a los elementos de interés público se encuentran involucrados hidrantes, elementos tecnológicos, redes de energía, pluviales, y sanitarias.



Tabla B. 31. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 3 (20 ppm).⁵⁰

RESULTADOS	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
COORDENADAS DE EPICENTRO (X,Y) :	103553,542	116698,177	
CONCENTRACIÓN: 20 ppm	EFEECTO: AEGL3	ELEMENTO: Cloro	30930,38 m²
Poblacion Total Promedio Afectada:	390,33	en 8 Manzanas	23050,22 m ²
INTERES AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:	1	4554,66 m ²	
INTERES PÚBLICO			
Elementos afectados de Hidrante:	3		
Elementos afectados de Tecnológico:	3		
Elementos afectados de Red Energía:	22		
Elementos afectados de Red Pluvial:	9		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	14		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	USAQUEN	
UPZs	UPZs afectadas : 1	TOBERIN	
SECTORES	Sectores afectados : 1	EL TOBERIN	

- AEGL 2 (2 ppm)

El AEGL 2 abarca un área de 184914,18 m², afectando una población de 4069 habitantes repartidos en 32 manzanas. Entre los elementos de impacto ambiental

⁵⁰ Para el caso del cloro y otras sustancias explosivas es importante analizar los elementos de interés público en términos de explosiones.

 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. SOBERANO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

se encuentran parques, rondas de ríos y zonas de manejo ambiental. Estos elementos pueden modificar significativamente el impacto después de una emisión tóxica, dependiendo la relación que tengan con la población y con otros elementos ambientales. Los elementos de interés público involucrados son hidrantes, colegios distritales, instituciones de Bienestar Social, elementos de las redes de energía, pluvial, sanitaria y del acueducto, entre otros. Estos se encuentran distribuidos en los sectores El Toberin, La Pradera Norte y Las Orquídeas, ubicadas en la UPZ de Toberín en la localidad de Usaquén.





 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

Tabla B. 32. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 2 (2 ppm).⁵¹

RESULTADOS	VALOR1	VALOR2	VALOR3
COORDENADAS DE EPICENTRO (X,Y) :	103553,542	116698,177	
CONCENTRACIÓN: 2 ppm	EFEECTO: AEGL2	ELEMENTO: Cloro	184914,18 m²
Población Total Promedio Afectada:	4068,69	en 32 Manzanas	145412,90 m ²
INTERES AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:	4	11323,78 m ²	
Elementos afectados de Ronda Río (POT):	1	8285,49 m ²	
Elementos afectados de Zonas Manejo Ambiental:	1	8245,42 m ²	
INTERES PÚBLICO			
Elementos afectados de IPS:	2		
Elementos afectados de Hidrante:	2		
Elementos afectados de Colegio Distrital:	2		
Elementos afectados de Estación Inalámbrica:	1		
Elementos afectados de Bienestar Social:	5		
Elementos afectados de Equipamiento:	4		
Elementos afectados de Sitio UAEDC:	3		
Elementos afectados de Tecnológico:	6		
Elementos afectados de Red Energía:	85		
Elementos afectados de Red Pluvial:	42		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	66		
Elementos afectados de Red Acueducto:	19		
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	USAQUEN	
UPZs	UPZs afectadas : 1	TOBERIN	
SECTORES	Sectores afectados : 3	EL TOBERIN, LA PRADERA NORTE, LAS ORQUIDEAS	

⁵¹ Para el caso del cloro y otras sustancias explosivas es importante analizar los elementos de interés público en términos de explosiones.

 <p>ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

- AEGL 1 (30 ppm)

El AEGL 1 (30 ppm) abarca un área de 507856,68 m², la cual abarca una población de 15584 habitantes. Esta emisión involucra los sectores de El Toberin, La Pradera Norte, Las Orquídeas, San Cristóbal Norte, Bosque, en las UPZ San Cristóbal Norte y Toberin. En la localidad de Usaquén. Entre los elementos ambientales impactados se encuentran parques con un área de 22599,63 m², elementos de ronda de río, de sistemas de áreas protegidas y de zonas de manejo ambiental. Entre los elementos de interés público se encuentran hidrantes, torres de alta tensión, colegios privados, estaciones inalámbricas, elementos de la policía, elementos de la red de energía, de la línea de alta tensión, pluvial, sanitaria y acueducto.



	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	
---	--	---

Tabla B. 33. Efecto de la nube tóxica simulada en SLAB para el AEGL 1 (0,5 ppm).⁵²

RESULTADOS	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
COORDENADAS DE EPICENTRO (X,Y) :	103553,542	116698,177	
CONCENTRACIÓN: 0,5 ppm	EFEECTO: AEGL1	ELEMENTO: Cloro	507856,68 m²
Población Total Promedio Afectada:	15583,15	en 108 Manzanas	386285,9 m ²
INTERES AMBIENTAL			
Elementos afectados de Parque:	12	22599,63 m ²	
Elementos afectados de Ronda Río (POT):	1	6555,28 m ²	
Elementos afectados de Sistema Áreas Protegidas:	2	1551,58 m ²	
Elementos afectados de Zonas Manejo Ambiental:	1	6577,12 m ²	
INTERES PÚBLICO			
Elementos afectados de Torre alta tensión:	5		
Elementos afectados de Hidrante:	9		
Elementos afectados de Colegio Privado:	6		
Elementos afectados de Estación Inalámbrica:	3		
Elementos afectados de Bienestar Social:	18		
Elementos afectados de Equipamiento:	13		
Elementos afectados de Policía:	1		
Elementos afectados de Sitio UAECD:	17		
Elementos afectados de Tecnológico:	1		
Elementos afectados de Red Energía:	139		
Elementos afectados de Línea Alta Tensión:	2		
Elementos afectados de Red Pluvial:	138		
Elementos afectados de Red Sanitaria:	217		
Elementos afectados de Red Acueducto:	279		
CARTOGRAFÍA BASE			
LOCALIDADES	Localidades afectadas : 1	USAQUEN	
BARRIOS	Barrios afectados : 8	AINSUCA,EL JARDIN,HIPOLITO RESTREPO,VILLA DEL CARMEN (VILLA OLIVA),CALIFORNIA,SAN CRISTOBAL NORTE,VILLA OLIVA,CERROS NORTE	
UPZs	UPZs afectadas : 2	SAN CRISTOBAL NORTE,TOBERIN	
SECTORES	Sectores afectados : 7	EL TOBERIN,LA PRADERA NORTE,LAS ORQUIDEAS,SAN CRISTOBAL NORTE,BOSQUE DE PINOS,LA LIBERIA,BARRANCAS NORTE	

⁵² Para el caso del cloro y otras sustancias explosivas es importante analizar los elementos de interés público en términos de explosiones.

B. 2.2.2.2 Simulación SiDiG (Britter McQuaid)

Al igual que para el Escenario 1 de cloro, el modelo Britter McQuaid no puede predecir la distancia segura y el perfil de dispersión debido a que no cuenta con información para los rangos de concentración contemplados dado que este es un modelo empírico.

B. 2.2.2.3 Simulación en ALOHA®

A continuación en la Tabla 34 y en la Figura 18 se presentan los resultados de la simulación realizada con ALOHA®. El programa nuevamente empleó un modelo de Gas Denso (Heavy Gas), al igual que el escenario 1 de cloro.

Tabla B. 34. Reporte de la simulación realizada en ALOHA para el escenario de cloro planteado como fuga de un tanque de 1 t.

Condiciones atmosféricas	
Velocidad del viento (m/s)	1
Dirección del viento (°)	120
Altura de la medición ambiente (m)	10
Rugosidad (m)	0,03
Nubosidad (0-10)	10
Temperatura del aire (K)	280,15
Clase de estabilidad	F
No hay inversión	
Humedad (%)	70
Propiedades de la fuente (Parámetros de entrada)	
Fuente	Directa - Continua
Tasa de liberación (kg/s)	0,12
Tiempo de liberación (min)	1
Altura de la fuente (m)	0
Propiedades fuente (Parámetros de salida)	
Total cantidad emitida (lb)	15,9
Total cantidad emitida (kg)	7,21

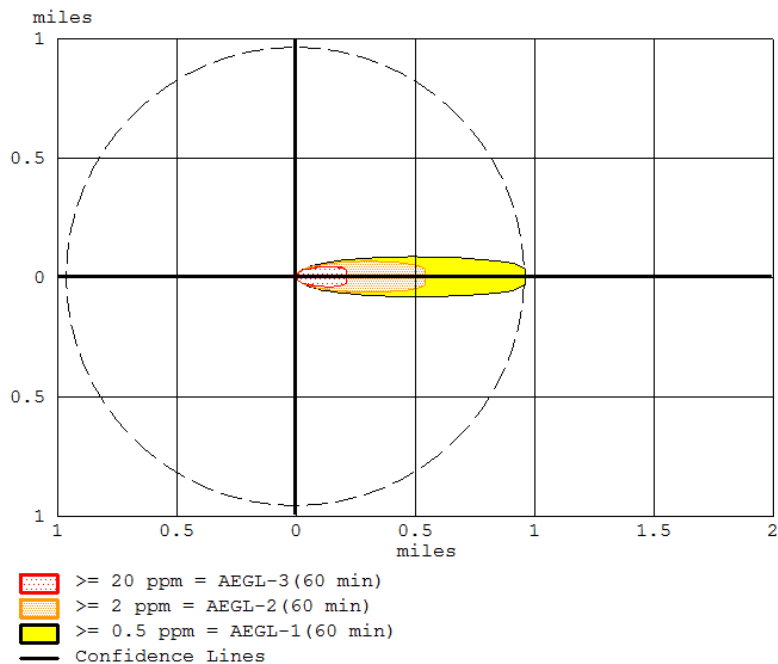


Figura B. 18. Simulación realizada en ALOHA para el escenario de cloro planteado como emisión desde un tanque de 1 t.

B. 2.2.2.4 Comparación de resultados

Los resultados obtenidos para este escenario se presentan en la Tabla B. 35. En este se presentan las distancias seguras para el modelo SLAB, el programa ALOHA® y la recomendación de la guía de respuestas tanto para emisiones pequeñas como para emisiones grandes. La dispersión calculada por el modelo SLAB se encuentra dentro de los valores presentados para emisiones pequeñas y altas en la GRE, esto es consistente con la magnitud de la emisión. Sin embargo la diferencia entre el valor calculado para SLAB y ALOHA® es más significativa en este escenario. En la tabla B.35 se presentan los valores reportados por la GRE tanto para emisiones pequeñas como para emisiones altas puesto que el escenario planteado considera un tanque de 1t de cloro. Las emisiones pequeñas en la GRE consideran envases hasta de 200 litros; teniendo en cuenta la densidad del cloro, este valor en masa corresponde a 320 kg o 0,32t aproximadamente. La Tabla B.35 refleja que los resultados obtenidos por el modelo SLAB se encuentran en el rango de los valores reportados en la GRE. Los contenedores de cloro tienen capacidades hasta de 400t (Sección 2.1); sin embargo, la guía no reporta la capacidad de los contenedores considerados en la categoría de derrames grandes.

Tabla B. 35. Resultados de las simulaciones en ALOHA® y programa SLAB, comparadas con la GRE (Escenario de emisión tanque 1 t) – TAV= 60 min.

	ALOHA (m)	SLAB (m)	GRE Emisiones pequeñas (m)	GRE Emisiones altas (m)
AEGL1 (0,5 ppm)	1550	3178	1600	8000
AEGL2 (2 ppm)	872	1633	-	-
AEGL3 (20ppm)	344	468	-	-

La Tabla B.35 refleja que los resultados obtenidos por el modelo SLAB se encuentran en el rango de los valores reportados en la GRE. Para una mejor interpretación de los valores obtenidos se debe consultar Sección B. 1.2.4.5.

B. 2.3 Liberación de acuerdo al tipo de falla


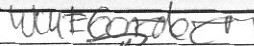


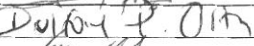



Los valores aquí presentados para tasas de emisión pretenden dar un rango aproximado de las emisiones posibles dependiendo del tipo de fuga y el tipo de falla. Sin embargo estos deben ser empleados cuidadosamente considerando que otras variables también determinan la tasa de emisión.

Tabla 36. Tasas de liberación esperada en la industria de cloro para diferente tipo de contenedores.

Condiciones de almacenamiento	Tipos de envases	Tipo de falla	Tamaño del agujero (m2)	Tasa de pérdida (kg/s)
Presurizado a temperatura ambiente T=13,5°C P=120psig	Cilindro (1 Ton)	Agujero en el tanque en la fase líquida	0,01	498
			0,001	49,23
			0,0001	4,87
		Agujero en el tanque en la fase gaseosa	0,01	33,78
			0,001	3,45
			0,0001	0,342
	Cilindros pequeños (65 Kg)	Rompimiento a más de 10 cm del tanque	0,01	20,63
			0,001	2,06
			0,0001	0,20
		Agujero en el tanque en la parte líquida	0,0001	4,85

Anexo C

ACTAS COMITÉS TÉCNICOS



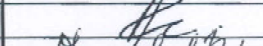
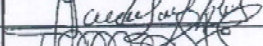


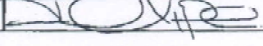

 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Prevención y Atención Emergencias</p>				<p align="center">ACTA DE REUNIÓN No. 1</p>				CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2		
				CÓDIGO DOCUMENTAL									
TEMA	Reunión de Comité Técnico					ÁREA RESPONSABLE	Técnica y de Gestión						
FECHA	20	10	2010	LUGAR	Hotel Bacatá		HORA	03:00 p.m.		HOJA	__	DE	__
AGENDA													
Reunión de Comité Técnico del Convenio 453 de 2010													
DESARROLLO DE LA AGENDA													
<p>1. Fecha de Inicio del Convenio: Una vez realizada la legalización del convenio, se informa que la fecha de inicio del Convenio es el 14 de Octubre de 2010.</p> <p>2. Conformación del Comité Técnico del Convenio. Se define que el Comité Técnico estará integrado formalmente por las siguientes personas: Por el FOPAE • Delegado del Director: Lucy Esperanza González Marentes • Responsable del Grupo de Industria: Faride P Solano Hamidan • Coordinación de Investigación y Desarrollo: Lindon Losada Palacios Por la Universidad de los Andes • Delegado Rector: Felipe Muñoz • Delegado Decano de la Facultad de Ingeniería: Jorge Mario Gomez • Delegado del Director del Departamento de Ingeniería Química: Jorge Mario Gomez</p> <p>3. Fecha y frecuencia de las reuniones del Comité Técnico. Se define que el Comité Técnico se reunirá mensualmente, el jueves de la tercera semana de cada mes, a las 8:00 A.M. Esta fecha podrá modificarse a solicitud de las partes y previa aprobación de los miembros del Comité. La citación del Comité la realizará por parte de la Universidad de Los Andes.</p> <p>4. Reuniones Técnicas: Con el fin de realizar una adecuada transferencia de conocimiento, se acuerdan reuniones de carácter técnico entre la Universidad y la Coordinación de Gestión Sectorial del FOPAE, las cuales se definirán de acuerdo con las necesidades que se establezcan.</p> <p>5. Reuniones con la Coordinación de Informática del FOPAE. Con el fin de cumplir con las especificaciones técnicas de entrega de información, se acuerda programar una reunión con personal de la Universidad de los Andes y con personal de la Coordinación de Informática del FOPAE (Sistemas de información Geográfica y Centro de Documentación) lo antes posible.</p> <p>6. Pago No. 1: El FOPAE indica a la Universidad de los Andes que conforme a la Cláusula Décima del convenio se debe realizar la entrega de la factura correspondiente al primer pago, el cual se realiza una vez efectuada la legalización del convenio.</p> <p>7. Póliza: El FOPAE solicita a la Universidad la actualización de la póliza, en lo relacionado con la fecha de inicio del convenio (14 de octubre de 2010).</p> <p>8. Informes: El FOPAE recuerda a la Universidad la entrega del informe No. 1, el cual debe ser radicado en la Entidad.</p>													
COMPROMISOS													
ACTIVIDAD				RESPONSABLE				FECHA					
								DÍA	MES	AÑO			
Radicar Factura del pago No. 1				Universidad de los Andes				20	10	2010			
Entregar Informe No. 1				Universidad de los Andes				29	10	2010			
Actualización Póliza				Universidad de los Andes									
Reunión con la Coordinación de Informática				Universidad de los Andes - FOPAE				8	11	2010			
Reunión Técnica				Universidad de los Andes - FOPAE				3	11	2010			
PARTICIPANTES													
INVITADOS A LA REUNIÓN			AUSENCIA JUSTIFICADA		DEPENDENCIA / ENTIDAD		FIRMA DE ASISTENTES						
Lucy Esperanza González					FOPAE								
Lindon Losada Palacios					FOPAE								
Faride Solano					FOPAE								
Jesús Rojas					FOPAE								
Dulfay Ortiz					FOPAE								
Jorge Mario Gómez					Universidad de los Andes								
Felipe Muñoz Giraldo					Universidad de los Andes								




CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO - ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"



		ACTA DE REUNIÓN No. 2			CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2	
					CÓDIGO DOCUMENTAL				
TEMA	Segunda Reunión de Comité Técnico			AREA RESPONSABLE	Técnica y de Gestión				
FECHA	26	11	2010	LUGAR	FOPAE	HORA	02:00 p.m.	HOJA 1 DE 1	
AGENDA									
Revisión de compromisos del acta anterior									
Presentación de los avances en el convenio									
Resolución de inquietudes									
Otros temas									
DESARROLLO DE LA AGENDA									
<p>1. Compromisos del acta anterior: por parte de la universidad ya se realizó la entrega del Informe N°1 con la consecuente revisión y recibido a satisfacción del mismo, así como la actualización de la póliza. De acuerdo con lo anterior, el FOPAE canceló la obligación correspondiente al pago N°1 a través de la Factura de Pago N°1. Se realizó una reunión técnica (noviembre 03 de 2010) y la correspondiente con informática y SIG (noviembre 19 de 2010).</p> <p>2. Presentación de avances: El ingeniero Felipe Muñoz hace una breve presentación de los siguientes aspectos de avance del estudio: *Modelos revisados: Modelo de caja, Modelo de pluma, Modelo SLAB, Modelo Britter-McQuaid, Modelo CFD-FLACS. *Criterios de selección: Tipos de emisiones (instantáneas y continuas), Tipos de fuentes, Modos de dispersión, Supuestos. *Diseño de la herramienta computacional: basada en los modelos escogidos, diseñada bajo ambiente windows y construida en lenguaje Java. Incluye una base de datos de características de sustancias más densas que el aire y utiliza valores AEGL (Acute Exposure Guideline Levels) aplicables a períodos de exposición en una emergencia, en lugar de utilizar los datos de TLV TWA, TLV STEL, TLV C o similares que son utilizados en exposiciones de salud ocupacional. La validación de la herramienta se ha realizado con base en ejemplos existentes y con la utilización de CFD-FLACS. Atendiendo la sugerencia planteada en la reunión técnica del 19 de noviembre, la herramienta se ha complementado con un acceso a Google Earth para facilitar la espacialización de los resultados de las simulaciones en la herramienta.</p> <p>3. Inquietudes: Se pregunta por los casos en los que se pudieran presentar fugas de varias sustancias y en situaciones de lluvia y por los criterios de escogencia de los valores de isoconcentración a simular, a lo que el ingeniero Felipe Muñoz aclara que el supuesto de los modelos es que las sustancias son inertes (no reaccionan) y que no se presenta precipitación. También aclara que para poder simular el alcance del riesgo público, se debe escoger entre el 50% y 10% del valor de concentración AEGL 2 de la sustancia en cuestión.</p> <p>4. Informes: El FOPAE recuerda a la Universidad que de acuerdo con el cronograma, la entrega del informe No. 2 debe realizarse el 01 de diciembre, el cual debe ser radicado en la Entidad.</p> <p>5. Otros temas: El ingeniero Felipe Muñoz informa que el desarrollo de la herramienta está participando en un evento en Estados Unidos. Por otro lado, manifiesta que los Derechos de Copyright del Software serán tanto del FOPAE como de la Universidad.</p>									
COMPROMISOS									
ACTIVIDAD				RESPONSABLE			FECHA		
							DÍA	MES	ANO
Radicación de Informe N° 2				Universidad de los Andes			01	12	2010
Reunión Mensual de Comité				Universidad de los Andes - FOPAE			15	12	2010
Revisión del Informe N°2				FOPAE			13	12	2010
PARTICIPANTES									
INVITADOS A LA REUNIÓN	AUSENCIA JUSTIFICADA	DEPENDENCIA / ENTIDAD	FIRMA DE ASISTENTES						
Lucy Esperanza González		FOPAE							
Lindon Losada Palacios		FOPAE							
Faride Solano		FOPAE							
Jesus Rojas		FOPAE							
Fernando Ospina		FOPAE							
Jorge Mario Gomez		Universidad de los Andes							
Felipe Muñoz Giraldo		Universidad de los Andes							

		ACTA DE REUNIÓN No. 3				CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2
						CÓDIGO DOCUMENTAL			
TEMA	Tercera Reunión de Comité Técnico. Convenio 453 de 2010, FOPAE - Universidad de los Andes, Nube Tóxica				ÁREA RESPONSABLE	Técnica y de Gestión			
FECHA	15	12	2010	LUGAR	FOPAE	HORA	08:00 a.m.	HOJA 1 DE 1	
AGENDA									
Lectura del acta anterior									
Avances									
Otros temas									
DESARROLLO DE LA AGENDA									
<p>1. Compromisos del acta anterior: por parte de la universidad ya se realizó la entrega del Informe N°2. El 30 de noviembre se realizó una reunión técnica con el grupo SIG del FOPAE para la revisión de las capas de información disponibles en la entidad y que estarían a disposición del grupo de trabajo de la universidad. El mismo 30 de noviembre se radicó por parte de la universidad, la comunicación formal de solicitud de dichas capas.</p> <p>2. Avances: El Informe N°2 ya fue revisado y se generó una comunicación electrónica con los comentarios al mismo. El ingeniero Felipe Muñoz manifiesta que tales observaciones ya se han adelantado. Aclara también que en el Informe N°2 fueron incluidos avances de los temas correspondientes al Informe N°3, como por ejemplo el capítulo de "Construcción de Escenarios" el cual se desarrollará más a fondo en tal informe. Es entregada por parte de los ingenieros Muñoz y Gómez, una versión impresa con los comentarios de avance sobre las observaciones enviadas.</p> <p>Con respecto a los temas de SIG, se está trabajando toda la integración con la herramienta bajo software ArcGIS 10, por lo que se solicita que se revise la instalación de esta versión en la entidad y poder verificar la compatibilidad con los recursos del FOPAE.</p> <p>3. Otros temas: Con el fin de cumplir con las fechas de radicación de facturas en la entidad, la universidad solicita que una vez realizada la revisión de la segunda versión del Informe N°2, se envíe una comunicación electrónica con la notificación de recibido a satisfacción para que desde la universidad se genere la factura correspondiente.</p> <p>El ingeniero Felipe Muñoz informa que el desarrollo de la herramienta fue ganador en un evento en Estados Unidos y que se espera la realización de un comunicado con esta noticia para ser publicado tanto por la universidad como por el FOPAE.</p>									
COMPROMISOS									
ACTIVIDAD				RESPONSABLE			FECHA		
							DÍA	MES	AÑO
Radicación de Informe N° 2 versión 2				Universidad de los Andes			16	12	2010
Reunión Mensual de Comité				Universidad de los Andes - FOPAE			26	01	2010
Radicación de factura segundo pago				Universidad de los Andes			20	12	2010
PARTICIPANTES									
INVITADOS A LA REUNIÓN	AUSENCIA JUSTIFICADA	DEPENDENCIA / ENTIDAD		FIRMA DE ASISTENTES					
Lucy Esperanza González		FOPAE							
Lindon Losada Palacios		FOPAE							
Jesús Rojas		FOPAE							
Faride Solano		FOPAE							
Fernando Ospina		FOPAE							
Jorge Mario Gómez		Universidad de los Andes							
Felipe Muñoz Giraldo		Universidad de los Andes							



 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>		ACTA DE REUNIÓN No. 4		CÓDIGO PLE-FT-09	VERSIÓN 2
		CÓDIGO DOCUMENTAL			
TEMA	Cuarta Reunión de Comité Técnico. Convenio 453 de 2010, FOPAE - Universidad de los Andes, Nube Tóxica		ÁREA RESPONSABLE	Técnica y de Gestión	
FECHA	26	01	2011	LUGAR FOPAE	HORA 08:00 a.m.
AGENDA					
Lectura del acta anterior y revisión de compromisos					
Avances					
Otros temas					
DESARROLLO DE LA AGENDA					
<p>1. Compromisos del acta anterior: por parte de la universidad se realizó la radicación del Informe de Avance N°2 el 16 de diciembre de 2010, el cual contó con la revisión y aprobación respectivas. De esta forma, se realizó el segundo pago correspondiente al 50% restante del valor contratado.</p> <p>2. Avances: El ingeniero Felipe Muñoz presenta una nueva versión de la herramienta computacional, la cual cuenta con algunas modificaciones en la interfaz y explica cómo funciona la integración con el software ArcGIS (la universidad radicó CD con Instaladores para las versiones 9.3 y 10 de ArcGIS con los ajustes realizados a la fecha, Documento Word con el manual de instalación y manual de usuario, código fuente de programación, archivos que se abren con Visual Basic Studio, Geodatabase "ModeloZonas.gdb"). La ingeniera Faride Solano informa que desde la Coordinación de Informática se recibió confirmación acerca de la versión de ArcGIS con la que se debe recibir la herramienta, definiendo que es la versión 10.</p> <p>La herramienta fue denominada "SiDiG" (Simulación de Dispersión de Gases). El código fuente de programación de esta herramienta, se entrega abierto y se abre bajo Visual Basic Studio, para futuras actualizaciones. El ingeniero Muñoz solicita revisar con el área de información pública, lo relacionado con el diseño gráfico de la ventana de identificación del software (paleta de colores, ubicación de los logos y contenido), así como la revisión y trámite del poder para gestionar el registro del software ante la Dirección Nacional del Derecho de Autor, del Ministerio del Interior, definir el número de usuarios de la herramienta, definir una jornada de instrucción sobre su uso y los escenarios de eventos con cloro y amoníaco a analizar. Añade que la jornada de instrucción de la herramienta, puede realizarse en las instalaciones de la Universidad. A lo anterior, la ingeniera Faride Solano, propone que la construcción de los escenarios sea conjunta entre el FOPAE y la Universidad.</p> <p>Con respecto a las capas cartográficas entregadas por el FOPAE, el ingeniero Muñoz solicita realizar una consulta sobre la diferencia entre aquella denominada "Población manzana catastro DANE" y "LMA_2010_POB_LOT_PR". La ingeniera Lucy González consulta sobre la posibilidad de enlazar los datos de la Red de Calidad del Aire de la SDA con la herramienta, con el fin de obtener información inicial, acerca de la magnitud y dirección del viento, para la simulación por parte del analista (usuario), a lo que el ingeniero Muñoz responde que no es posible ya que no se encuentra dentro de los alcances del convenio. Sin embargo, la ingeniera Lucy González solicita hacer una revisión de las áreas de influencia de las estaciones e incluir una tabla de orientación para el analista que permita, según la ubicación del punto de emisión, definir a qué estación pertenece y obtener los datos de velocidad y dirección del viento predominantes en esa zona.</p> <p>Continuando con la presentación de la integración con ArcGIS, aclara que el reporte del SIG sobre afectaciones, contiene la información de la cantidad de estaciones, equipamientos y demás criterios de interés y el área cubierta por cada uno de los valores AEGL simulados, más no identifica con nombre propio cuáles son. En este punto, la ingeniera Lucy González solicita realizar una revisión de cómo se realiza el análisis sobre la afectación a las redes de acueducto, alcantarillado, electricidad y gas. El ingeniero Fernando Ospina solicita también revisar la posibilidad de seleccionar el tipo de información que se obtiene en el reporte, de manera que el analista (usuario) no tenga que transcribir lo de su interés.</p> <p>3. Otros temas: El ingeniero Felipe Muñoz informa que se están adelantando las gestiones para la publicación del comunicado sobre el premio recibido en el International Student Awards.</p> <p>La ingeniera Faride Solano informa que la revisión de la integración de la herramienta con ArcGIS 10 y otras consultas a cargo del FOPAE, pueden tardarse debido a los procesos de contratación que se están efectuando en la entidad.</p>					




CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO - ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"



		ACTA DE REUNIÓN No. 4			CÓDIGO PLE-FT-09	VERSIÓN 2
		CÓDIGO DOCUMENTAL				
TEMA	Cuarta Reunión de Comité Técnico. Convenio 453 de 2010, FOPAE - Universidad de los Andes, Nube Tóxica			ÁREA RESPONSABLE	Técnica y de Gestión	
FECHA	26 01 2011	LUGAR	FOPAE		HORA	08:00 a.m.
COMPROMISOS						
ACTIVIDAD		RESPONSABLE			FECHA	
					DIA	MES
					AÑO	
Revisión de capas de información de población		FOPAE			28	01
Revisión de CD con archivos de integración en ArcGIS		FOPAE			01	02
Consulta sobre ventana de presentación del software		FOPAE			28	01
Gestión ante oficina jurídica para trámite de documentos para el registro del software		FOPAE			27	01
Análisis de resultados de simulación sobre redes		Universidad de Los Andes			27	02
Inclusión de tabla de predominancia de dirección y velocidad del viento para las estaciones de la RCAB		Universidad de Los Andes			16	02
Jornada de instrucción de la herramienta		FOPAE-Universidad de Los Andes			-	-
					2011	
PARTICIPANTES						
INVITADOS A LA REUNIÓN	AUSENCIA JUSTIFICADA	DEPENDENCIA ENTIDAD	FIRMA DE ASISTENTES			
Lucy Esperanza González		FOPAE				
Lindon Losada Palacios		FOPAE				
Jesús Rojas		FOPAE				
Faride Solano		FOPAE				
Fernando Ospina		FOPAE				
Jorge Mario Gómez		Universidad de los Andes				
Felipe Muñoz Giraldo		Universidad de los Andes				

	<p style="text-align: center;">CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	
---	--	---

	ACTA DE REUNIÓN No. 5		CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2		
			CÓDIGO DOCUMENTAL					
TEMA	Quinta Reunión de Comité Técnico. Convenio 453 de 2010, FOPAE - Universidad de los Andes, Nube Tóxica		ÁREA RESPONSABLE		Técnica y de Gestión			
FECHA	09	03	2011	LUGAR	FOPAE	HORA	02:30 p.m.	HOJA 1 DE 1
AGENDA								
Compromisos del acta anterior								
Presentación de avances								
Otros temas								
DESARROLLO DE LA AGENDA								
<p>Antes de iniciar con la reunión, se aclara que ésta corresponde a la del mes de febrero y que por eventos de última hora fue reprogramada. Para continuar con el cumplimiento de la segunda cláusula del convenio se realizará la sexta reunión del Comité Técnico el 30 de marzo de 2011 a las 2:00 pm.</p>								
<p>1. Compromisos del acta anterior: El ingeniero Felipe Muñoz, menciona que para hacer más ágil la reunión, durante su presentación se tratará el desarrollo de cada uno de los compromisos del acta anterior.</p>								
<p>2. Presentación de Avances: El ingeniero Felipe Muñoz presenta nuevos ajustes de la herramienta computacional, incluyendo las modificaciones de la pantalla inicial y la ventana de trabajo, cumpliendo con los requerimientos de la diseñadora gráfica de la entidad. Con respecto al funcionamiento de la herramienta: 1) Se modificó el formato de los archivos de salida sólo en extensión *.bt para evitar confusiones con los archivos. 2) Se agregó una ventana en la que se explica el concepto de AEGL para orientación del usuario. 3) Por default, los resultados de las simulaciones estarán relacionados con los 3 AEGLs de la sustancia seleccionada. 4) Se agregó a la ventana de trabajo, información sobre la distancia segura y ancho máximo de nube, coordenadas de ubicación en el plano cartesiano y ángulo de dirección de la nube. Con el ángulo se logra la visualización sobre Google Earth. 5) Se retiró el ícono de ArcGIS ya que daría al usuario una idea de que con hacer click sobre él, se exportarían los datos directamente al SIG cuando no es así. 6) En la exportación de los datos de simulaciones de emisiones discontinuas, el usuario elijirá los isocontornos y los tiempos, y los datos se exportarán en archivos independientes, uno por cada instante que el usuario haya elegido. 7) Los archivos exportados tendrán por default la siguiente estructura en su nombre: Tipo de modelo, Sustancia, Fecha, tipo de emisión, instante de tiempo. De lo anterior, se radica CD con archivos de prueba para revisar en los computadores del FOPAE.</p>								
<p>Por otro lado, el ingeniero Muñoz solicita al FOPAE definir cuál es la cartografía de interés ya que no es posible seleccionar de una lista desplegable, las capas a analizar. A lo anterior, la ingeniera Faride aclara que las capas entregadas fueron las solicitadas por la universidad y que de acuerdo con la inquietud expresada por la ingeniera Lucy González en la reunión pasada, lo que se había solicitado era una revisión de la interpretación de los resultados de las afectaciones sobre las redes de acueducto, alcantarillado, electricidad y gas.</p>								
<p>Teniendo en cuenta lo anterior, se hará el ejercicio de la selección de las capas haciendo la salvedad que se requiere la opinión de la universidad para el análisis de los resultados sobre esas capas. Lo anterior resuelve la inquietud del ingeniero Ospina de la reunión pasada, confirmando que el reporte de las afectaciones no puede ser selectivo y se obtendrán los resultados de todas las capas; la información de las capas de interés debe extraerse manualmente.</p>								
<p>Con respecto a las estaciones climatológicas para la obtención de datos de velocidad y dirección del viento, se construyó un shape file con áreas de influencia por cada estación de la SDA y algunas de la CAR y se construyó una tabla dinámica con información histórica promedio mensual de las estaciones. Esta tabla debe ser actualizada manualmente de acuerdo con la información en línea que publica la SDA. La ingeniera Lucy solicita que se envíe la metodología que se siguió para la determinación de tales áreas.</p>								
<p>Con referencia a la construcción de escenarios, la propuesta es seleccionar dos casos, aplicarlos en un software libre (específicamente ALOHA) y hacer la comparación con la herramienta desarrollada, para terminar con la construcción de un documento guía. A lo anterior el ingeniero Muñoz hace la solicitud de establecer una jornada para esta actividad y más detalles sobre la información de los escenarios. Sugiere también, que tales escenarios sean ruptura de un fusible de un cilindro de cloro de 1 ton en ruta y un caso con cilindro pequeño en una chatarrería. Con respecto a la información para los escenarios, la ingeniera Faride aclara que la información enviada corresponde a eventos ocurridos y que fue extractada desde el SIRE, y por tanto no es muy detallada. Eventos con cloro adicionales enviados a la universidad, fueron algunos datos enviados de manera preliminar por Brinsa. A lo anterior la ingeniera Lucy solicita ampliar los contactos con Oxígenos de Colombia para lo correspondiente a amoníaco y nuevamente pedir a Brinsa datos más detallados de los eventos atendidos.</p>								
<p>Con respecto al registro del software y la cesión de derechos, el ingeniero Muñoz informa que ya se están adelantando los trámites y que se está a la espera del poder del FOPAE para continuar con el registro. La ingeniera Faride añade que los documentos ya fueron revisados por la oficina jurídica de la entidad.</p>								
<p>Queda pendiente por definir el número de usuarios (se aclara que es el número de usuarios simultáneos) para restringir el uso de la herramienta y las fechas de capacitación de la herramienta.</p>								
<p>La ingeniera Faride pregunta sobre el esquema de la jornada de capacitación, ya que las expectativas de tal jornada están centradas en entender por qué se escogen ciertos parámetros y cómo debe ser la interpretación de los resultados. A lo anterior, el ingeniero Muñoz añade que tal jornada se haría en un día en dos sesiones, una para los técnicos SIG y otra para la explicación del funcionamiento del SIDIG.</p>								
<p>Se acuerda como fecha para la próxima reunión de Comité el 30 de marzo de 2011 a las 2:00 pm.</p>								
<p>3. Otros temas: El ingeniero Felipe Muñoz comenta que se envió la Información del premio recibido en el International Student Travel Awards en el marco de la reunión anual de la Society for Risk Analysis (SRA).</p>								



CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO - ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"



		ACTA DE REUNIÓN No. 5		CÓDIGO PLE-FT-09	VERSIÓN 2
				CÓDIGO DOCUMENTAL	
TEMA	Quinta Reunión de Comité Técnico. Convenio 453 de 2010, FOPAE - Universidad de los Andes, Nube Tóxica		ÁREA RESPONSABLE	Técnica y de Gestión	
FECHA	09	03	2011	LUGAR	HORA
			FOPAE		02:30 p.m.
COMPROBANDOS					
ACTIVIDAD		RESPONSABLE		FECHA	
				DÍA	MESES
					AÑO
Selección de capas de información		FOPAE			2011
Revisión de CD con archivos de integración en ArcGIS		FOPAE		15	03 2011
Jornada de instrucción de la herramienta		FOPAE-Universidad de Los Andes			2011
Envío de la metodología de definición de áreas de influencia de las estaciones climatológicas		Universidad de Los Andes			2011
Envío del contenido de la jornada de capacitación.		Universidad de Los Andes			2011
Jornada de construcción de escenarios		FOPAE-Universidad de Los Andes			2011
Definición de usuarios simultáneos		FOPAE			2011
PARTICIPANTES					
INVITADOS A LA REUNIÓN	AUSENCIA JUSTIFICADA	DEPENDENCIA ENTIDAD		FIRMA DE ASISTENTES	
Lucy Esperanza González		FOPAE			
Lindon Losada Palacios		FOPAE			
Jesús Rojas		FOPAE			
Faride Solano		FOPAE			
Fernando Ospina		FOPAE			
Jorge Mario Gómez		Universidad de los Andes			
Felipe Muñoz Giraldo		Universidad de los Andes			



CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"





	ACTA DE REUNIÓN No. 6				CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2
					CÓDIGO DOCUMENTAL			
TEMA	Sexta Reunión de Comité Técnico. Convenio 453 de 2010, FOPAE - Universidad de los Andes, Nube Tóxica				ÁREA RESPONSABLE	Técnica y de Gestión		
FECHA	30	03	2011	LUGAR	FOPAE	HORA	02:30 p.m.	HOJA 1 DE 1
DESARROLLO DE LA AGENDA								
Compromisos del acta anterior								
Presentación de avances								
<p>Antes de iniciar con la reunión, se aclara que ésta corresponde a la del mes de marzo, dando cumplimiento a lo acordado en la reunión anterior.</p> <p>1. Compromisos del acta anterior: Se dio lectura a los compromisos del acta anterior y el ingeniero Felipe Muñoz anota para cada uno de ellos que: 1) la selección de las capas de información a entrecruzar en la herramienta ArcGIS, no se realizará como lista desplegable, sino en otra opción de la herramienta, de manera que ya no es necesario quitarlas del Geodatabase; sin embargo, seguirán apareciendo en el reporte del entrecruzamiento, pero sin dato numérico. Por tanto, se generará un nuevo CD para que sea revisado en los equipos de la entidad. 2) las jornadas de instrucción sobre la herramienta y la construcción de escenarios se realizaron los días 23 y 24 de marzo. Se aclara por parte de la ingeniera Faride Solano, que para el tema de construcción de escenarios se está gestionando con Brinsa y Amoquímicos, algunos datos de campo que sirven para el análisis de casos; justamente el día 31 de marzo se efectuará la visita a la planta de Amoquímicos quedando pendiente los datos de Brinsa. 3) Con respecto a los usuarios simultáneos de la herramienta, no se dejó restricción. 4) La metodología para la definición de las áreas de influencia de las estaciones meteorológicas fue enviada vía mail, a las ingenieras Faride Solano y Lucy González.</p> <p>2. Presentación de Avances: Para este punto el ingeniero Felipe Muñoz propone seguir los puntos mencionados en el correo electrónico enviado por la ingeniera Faride Solano el día 30 de marzo y el cual se anexa a esta acta. 1) La descripción de los modelos fuente mencionados durante la jornada de instrucción sobre la herramienta SiDiG, serán incluidos dentro del informe final. Estos modelos permiten que el ingeniero de proceso calcule el radio y área de la fuente, teniendo en cuenta variables como tipo de material, condiciones de presión y temperatura y tipo de falla. En este punto surge la discusión sobre cuál sería la mejor forma de que estos modelos fuente queden incluidos dentro de un aplicativo o cuál sería la estrategia para uso rápido y que pueda ser aprovechado por el FOPAE en caso de emergencia. Al respecto, el ingeniero Muñoz hace primero énfasis en que el convenio está centralizado en la dispersión de gases que el aire y que los modelos fuentes son un paso anterior que no hace el SiDiG. A lo anterior, el ingeniero Jorge Gómez propone la construcción de una tabla que relacione variables usadas en los modelos fuente como tipo de falla, condiciones de almacenamiento, tipos de envases y tasas de pérdidas probables teniendo en cuenta las condiciones de almacenamiento estándar del amoníaco (NH₃) y cloro (Cl₂), y que estos datos sean revisados con las empresas distribuidoras a modo de verificación según la experiencia, además, menciona la realización de un análisis de sensibilidad con el SiDiG, para obtener los porcentajes de error, de manera que el usuario de la herramienta sepa de antemano la incertidumbre de los resultados; esta propuesta es acogida. 2) El ingeniero Muñoz aclara que la herramienta puede ser entregada a industriales y puede ser usada en el FOPAE. Añade que para el caso de los industriales, se debe precisar que la responsabilidad sobre el uso de los resultados de la herramienta es sólo del usuario y de la calidad de los datos ingresados. Se consultará con el área jurídica de la universidad, la redacción de esta salvedad. Para el caso del FOPAE, en situación de emergencia, puede usar el modelo Britter-MC Quaid que requiere menos datos. 3) El ingeniero hace entrega del cronograma con las actividades faltantes. (Se anexa a esta acta)</p> <p>Por otro lado, las ingenieras Faride Solano y Lucy González solicitan revisar la redacción de los "Consejos" que aparecen en el SiDiG como en el caso del CMEDO en Fracción Másica de Líquido y las definiciones para los coeficientes de rugosidad.</p> <p>También se pregunta por la relación entre los datos de las estaciones meteorológicas y su uso dentro de la herramienta, a lo que el ingeniero Muñoz responde que los datos de las estaciones se usarían para hacer la representación del fenómeno en un escenario creíble o de emergencia, mientras que si se selecciona el parámetro de estabilidad F (condiciones de calma) sería el análisis del peor caso.</p>								





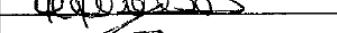







CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO - ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"






	ACTA DE REUNIÓN No. 6				CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2
					CÓDIGO DOCUMENTAL			
TEMA	Sexta Reunión de Comité Técnico. Convenio 453 de 2010, FOPAE - Universidad de los Andes, Nube Tóxica				AREA RESPONSABLE	Técnica y de Gestión		
FECHA	30	03	2011	LUGAR	FOPAE	HORA	02:30 p.m.	HOJA 1 DE 1
COMPROMISOS								
ACTIVIDAD				RESPONSABLE		FECHA		
						DIA	ME	AÑO
Revisión de "Consejos" dentro de SiDiG				Universidad de Los Andes		11	04	2011
Construcción de tabla guía con base en modelos fuente				Universidad de Los Andes		18	04	2011
Datos para la construcción de escenarios				FOPAE-Universidad de Los Andes		08	04	2011
PARTICIPANTES								
INVITADOS A LA REUNION	AUSENCIA JUSTIFICADA	DEPENDENCIA/ ENTIDAD		FIRMA DE ASISTENTES				
Lucy Esperanza González		FOPAE						
Lindon Losada Palacios		FOPAE						
Jesús Rojas	Reunión externa a Dirección	FOPAE						
Faride Solano		FOPAE						
Fernando Ospina		FOPAE						
Jorge Mario Gómez		Universidad de Los Andes						
Felipe Muñoz Giraldo		Universidad de Los Andes						



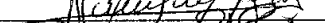





	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO - ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	
---	--	---

	ACTA DE REUNIÓN No. 7			CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2	
				CÓDIGO DOCUMENTAL				
TEMA	Séptima Reunión de Comité Técnico. Convenio 453 de 2010, FOPAE - Universidad de los Andes, Nube Tóxica			ÁREA RESPONSABLE		Técnica y de Gestión		
FECHA	03	05	2011	LUGAR	FOPAE	HORA	02:30 p.m. HOJA 1 DE 1	
AGENDA								
Compromisos del acta anterior								
Presentación de avances								
DESARROLLO DE LA AGENDA								
Antes de iniciar con la reunión se aclara que corresponde a la del mes de abril, que no fue posible realizar por temas de último momento ajenos a la voluntad de realizar la reunión.								
1. Compromisos del acta anterior: Se está trabajando en la revisión de los "Consejos" dentro del software SiDiG. Por otro lado, se ha logrado obtener los datos por parte de Brinsa y Amoquímicos para seguir complementando la construcción de escenarios y se ha trabajado en la construcción de la tabla guía con base en los modelos fuente.								
2. Presentación de Avances: por parte del ingeniero Muñoz, se realizó una introducción rápida del proyecto al ingeniero Darwin Ortiz quien reemplazó a la ingeniera Lucy González.								
En abril 11 se realizó una jornada de revisión inicial de construcción de escenarios con el ingeniero Felipe Muñoz y la ingeniera Claudia Moreno. Ese mismo día se realizó la revisión con la ingeniera Ángela Blanco, de algunos inconvenientes con el aplicativo SIG que se estaban presentando en los equipos de la entidad los cuales ya fueron solucionados y aprobados el 13 de abril por el ingeniero SIG de FOPAE, Gustavo Fuentes.								
En abril 18 se realizó otra jornada con la ingeniera Moreno en la que se realizó el ejercicio completo de los modelos fuente que se utilizarán para los escenarios de amoníaco y cloro en instalación fija.								
Con respecto al SiDiG se sigue buscando la falla en la conexión desde este software a la herramienta Google Maps.								
De otra parte se recuerda que el convenio finaliza el 13 de mayo y que es importante que la universidad radique el informe final para la respectiva revisión, aprobación y liquidación.								
Se acuerda que la próxima reunión correspondiente al mes de mayo, se realizará en mayo 11 de 2011.								
COMPROMISOS								
ACTIVIDAD				RESPONSABLE		FECHA		
						DÍA	MES	AÑO
Revisión completa de los escenarios planteados				FOPAE-Universidad de Los Andes				
Entrega del informe final				Universidad de Los Andes		13	05	2011
Revisión del error de conexión con Google Maps				FOPAE-Universidad de Los Andes				
PARTICIPANTES								
INVITADOS A LA REUNIÓN	AUSENCIA JUSTIFICADA	DEPENDENCIA / ENTIDAD	FIRMA DE ASISTENTES					
Darwin Ortiz		FOPAE						
Lindon Losada		FOPAE						
Jesús Rojas		FOPAE						
Faride Solano		FOPAE						
Fernando Ospina		FOPAE						
Jorge Mario Gómez		Universidad de Los Andes						
Felipe Muñoz		Universidad de Los Andes						

 <p>ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO - ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---


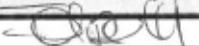
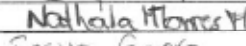
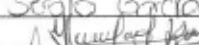
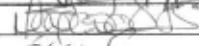
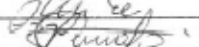


 <p>ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Fondo Prevención y Atención Emergencias</p>	ACTA DE REUNIÓN No. 8			CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2
TEMA				ÁREA RESPONSABLE		Técnica y de Gestión	
Octava Reunión de Comité Técnico. Convenio 453 de 2010, FOPAE - Universidad de los Andes, Nube Tóxica							
FECHA	11	05	2011	LUGAR	FOPAE	HORA	02:30 p.m. HOJA 1 DE 1
AGENDA							
Compromisos del acta anterior							
Presentación de avances							
DESARROLLO DE LA AGENDA							
<p>1. Compromisos del acta anterior: el ingeniero Felipe Muñoz presenta el contenido del informe final, el cual fue radicado en la entidad al iniciar esta reunión. De esta forma solicita se adelante la revisión en digital para las correcciones respectivas. Por otro lado se sigue trabajando en la construcción de los escenarios con base en los datos obtenidos de Brinsa y Amoquímicos.</p> <p>2. Presentación de Avances: el ingeniero Felipe Muñoz hace la relación del contenido del informe final radicado en medio magnético: aplicativo SIG, software SiDiG, actas de reunión recopiladas, presentaciones realizadas en las reuniones, archivos *.txt para probar en el SIG, hoja de datos, lomos y carátulas, informe final en formato *.doc, que incluye los anexos con las memorias de cálculo para dos casos (uno de cloro y uno amoniaco), manual de SiDiG, y las tablas o ábacos con los cuales se puede extraer información rápida de flujo másico para diferentes casos y con diferentes modelos fuente.</p> <p>Como adelanto de las conclusiones del proyecto el ingeniero Muñoz resalta que de acuerdo a las pruebas que han realizado, el SiDiG genera resultados más confiables para flujos másicos altos. Por otro lado, el ingeniero Darwin Ortiz nuevamente consulta sobre los usuarios finales de la herramienta y las situaciones en las que se usa el software, a lo que el ingeniero Muñoz responde que los usuarios son los privados ya que son quienes conocen los procesos y pueden plantear con precisión los escenarios de accidente y que por tanto, es una herramienta para la revisión de los planes de emergencia de los industriales cuando los presentan ante las autoridades distritales. En este mismo sentido aclara que en el software se incluyó la salvedad que los autores no se hacen responsables por el uso que los usuarios hagan del programa.</p> <p>El ingeniero Fernando Ospina recuerda que dentro de las actividades del convenio se encuentra la divulgación de los resultados ante las entidades del SDPAE y se solicita a la universidad hacer la radicación del informe en formato análogo para formalizar la radicación y la finalización del convenio. Hasta que no se tenga la revisión y recibo a satisfacción del informe final, no se procederá a la liquidación. El ingeniero Muñoz menciona que es importante realizar las reuniones que se consideren necesarias para la aclaración de temas y productos que conlleven al recibo a satisfacción, lo cual es coincidente con el pensamiento del FOPAE.</p> <p>Con respecto al registro del software, se están realizando todas las gestiones ante el área jurídica para obtener los documentos que permitan adelantar esta proceso.</p>							

 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. SOBERANO SEGURO Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO - ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
--	--	---

 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	ACTA DE REUNIÓN No. 8			CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2
				CÓDIGO DOCUMENTAL			
TEMA	Octava Reunión de Comité Técnico. Convenio 453 de 2010, FOPAE - Universidad de los Andes, Nube Tóxica			ÁREA RESPONSABLE		Técnica y de Gestión	
FECHA	11	05	2011	LUGAR	FOPAE	HORA	02:30 p.m. HOJA 1 DE 1
COMPROMISOS							
ACTIVIDAD				RESPONSABLE			FECHA
							DÍA MES AÑO
Entrega del informe final en formato análogo				Universidad de Los Andes			13 10 2011
PARTICIPANTES							
INVITADOS A LA REUNIÓN	AUSENCIA JUSTIFICADA	DEPENDENCIA / ENTIDAD	FIRMA DE ASISTENTES				
Darwin Ortiz		FOPAE					
Lindon Losada		FOPAE					
Jesús Rojas		FOPAE					
Faride Solano		FOPAE					
Fernando Ospina		FOPAE					
Jorge Mario Gómez		Universidad de Los Andes					
Felipe Muñoz		Universidad de Los Andes					

Anexo D

Actas Reuniones


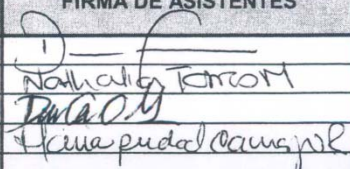
 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO MUNICIPAL Y COSEVICIOS Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>		<p align="center">ACTA DE REUNIÓN No. 01</p>			CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2
					CÓDIGO DOCUMENTAL			
TEMA	Convenio 453/2010. Contextualización eventos nube tóxica			AREA RESPONSABLE	Grupo Industria			
FECHA	03	11	10	LUGAR	FOPAE	HORA	08:00 a.m.	HOJA <u>1</u> DE <u>1</u>
AGENDA								
1. Presentación del grupo de trabajo								
2. Introducción a las características de las emisiones de gases								
3. Contextualización sobre los modelos de dispersión existentes								
4. Compromisos de las partes								
DESARROLLO DE LA AGENDA								
Esta reunión es la primera de tipo técnico desarrollada en el marco del convenio.								
El director del proyecto, Ing Felipe Muñoz, realizó explicación de conceptos generales de las emisiones de gases, incluyendo las diferencias de comportamiento cuando son gases más y menos densos que el aire, así como la introducción a los cinco (5) modelos de dispersión que se han revisado. Posteriormente, Sergio Garcia, continuó con la explicación de un caso de estudio con el cual se han comparado los resultados de las distancias seguras para un mismo valor de isoconcentración, con 4 modelos: Britter-McQuaid, SLAB, Pasquill-Gifford, y FLACS. Luego, la ingeniera Natalia Torres intervino explicando brevemente las características de software usado a nivel internacional para este tipo de fenómenos.								
También se informó por parte del FOPAE, que ya se realizó una revisión del primer informe cuyas observaciones serán remitidas en comunicación oficial desde la entidad.								
Por otro lado, el equipo de la universidad, solicita al FOPAE coordinar una reunión con el grupo SIG y de Informática de ambas partes, para discutir detalles de la herramienta informática que hace parte de los productos del convenio, así como los aspectos legales del registro de la misma.								
COMPROMISOS								
ACTIVIDAD		RESPONSABLE		FECHA				
				DIA	MES	AÑO		
Selección de casos específicos para la simulación		FOPAE						
Reunión con el área de SIG e Informática de ambas partes		FOPAE						
Consulta sobre divulgación de la herramienta informática y su registro		FOPAE-UNIANDES						
PARTICIPANTES								
INVITADOS A LA REUNIÓN	AUSENCIA JUSTIFICADA	DEPENDENCIA / ENTIDAD		FIRMA DE ASISTENTES				
Ing Felipe Muñoz		Universidad de Los Andes						
Ing Natalia Torres		Universidad de Los Andes						
Ing Sergio Garcia		Universidad de Los Andes						
Ing Jesús E. Ochoa		FOPAE						
Ing Fandi Solano		FOPAE						
Ing Sandra Estupiñán		FOPAE						
Ing Nelson Cuervo		FOPAE						
Ing Diana Ospina		FOPAE						





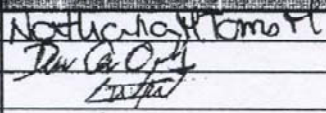
CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"




		ACTA DE REUNIÓN No. 02			CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2	
Presidencia y Asesoría Ejecutiva					CÓDIGO DOCUMENTAL				
TEMA	Convenio 453/2010. Aspectos de Informática y SIG			ÁREA RESPONSABLE	Grupo Industria				
FECHA	19	11	10	LUGAR	FOPAE. Oficina Informática	HORA	02:30 p.m.	HOJA 1 DE 1	
AGENDA									
1. Presentación del grupo de trabajo									
2. Introducción a las características del software de simulación									
3. Resolución de inquietudes									
4. Compromisos									
DESARROLLO DE LA AGENDA									
Esta reunión es de tipo técnico específicamente con el área de informática de FOPAE y el responsable de estos temas por la Universidad									
Se realizó una pequeña introducción de la temática del convenio al grupo de Informática del FOPAE, así como una presentación por parte de Alejandro Rodríguez del adelanto en el desarrollo del software de simulación.									
Posteriormente se inició la sesión de preguntas de las partes, donde la principal inquietud fue la relacionada con los requerimientos del software desarrollado y su compatibilidad de los recursos informáticos del FOPAE. Por parte de la universidad se aclara que los requerimientos tanto de hardware y sistema operativo son mínimos, pero sin embargo realizarán más pruebas en varios equipos, con el fin de realizar recomendaciones.									
La universidad pregunta por los requisitos de la presentación gráfica del software u otros relacionados con el tema. A lo anterior, por parte de Informática del FOPAE no se tienen requerimientos ya que nunca se había tenido una actividad similar y que este caso, sirve para plantear un procedimiento para que a futuro haya claridad en este tipo de situaciones.									
De igual forma, se hace la consulta a Yolima Rojas, del CDI, sobre los requisitos para la entrega del Manual de Usuario del software que se entregará al final del convenio, quedando como acuerdo, que el manual quedará como anexo al informe final, de acuerdo con las condiciones que ya están estipuladas en el documento "Especificaciones Técnicas para la Generación de Información Análoga y Digital" V.2.1 del FOPAE.									
Desde el grupo Industria, se planteó la posibilidad de incluir dentro del software, un comando que enlace con la herramienta de Google Earth para la ubicación geográfica de los resultados de la simulación. Alejandro Rodríguez evaluará la alternativa y se tendrá una respuesta de acuerdo con las modificaciones y las pruebas que realice sobre la programación del software.									
COMPROMISOS									
ACTIVIDAD				RESPONSABLE			FECHA		
							DÍA	MES	AÑO
Citación a próxima reunión con expertos SIG de FOPAE y UniAndes				Universidad de Los Andes			26	11	2010
PARTICIPANTES									
INVITADOS A LA REUNIÓN	AUSENCIA JUSTIFICADA	DEPENDENCIA / ENTIDAD			FIRMA DE ASISTENTES				
Alejandro Rodríguez		Universidad de Los Andes							
Nathalia Torres		Universidad de Los Andes							
Faride Solano		FOPAE Industria							
Diana Ospina		FOPAE Industria							
Olga Yolima Rojas		FOPAE CDI							
Ulver Morales		FOPAE Informática							
Piedad Camargo		FOPAE Informática							

 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO MUNICIPAL Y COSEVICIOS Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>		ACTA DE REUNIÓN No. 03				CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2	
						CÓDIGO DOCUMENTAL				
TEMA	Convenio 453/2010. Aspectos de SIG y otros				ÁREA RESPONSABLE	Grupo Industria				
FECHA	30	11	10	LUGAR	FOPAE. Oficina Grupo Industria	HORA	03:00 p.m.	HOJA 1 DE 1		
AGENDA										
1. Revisión de solicitud de capas de información geográfica										
2. Aspectos de conexión de la herramienta con ArcGis										
3. Aspectos de presentación de la información espacializada										
5. Otros										
DESARROLLO DE LA AGENDA										
Compromisos del acta anterior: esta reunión da cumplimiento al compromiso de la Universidad especificado en el acta de reunión 02.										
Para iniciar la reunión, la ingeniera Nathalia Torres aclara que la solicitud de las capas de información ya se radicó. Luego, la ingeniera Diana Fonseca delegada de SIG por parte de la Universidad, junto con la ingeniera Piedad Camargo, revisan los requerimientos de capas de información buscando la coincidencia con lo existente en la entidad. Como resultado, se tiene que además de la información solicitada por la universidad, serán facilitadas las siguientes capas: Aglomeraciones, Policía Nacional, Universidades, ICBF, Centros Comerciales, Equipamientos, cementerios, sitios de interés catastral, lotes y edificios. Estas capas de información se enviarán vía correo electrónico por parte de la ingeniera Piedad, junto con el acta de confidencialidad respectiva. Se aclara que para el caso de la información poblacional, ésta corresponde a los datos del censo 2005.										
Adicionalmente, se enviará una plantilla de formato (del tipo *.mxd) para cumplir con la presentación de los planos de salida de los resultados de las simulaciones y la simbología correspondiente.										
También se realizará dentro del aplicativo SIG de la herramienta, la conexión al georreferenciador para ubicar un punto de interés, tanto por dirección como por coordenadas.										
Se acuerda que para la entrega del producto del convenio, se generarán dos Metadatos que corresponderán a los resultados de los dos casos que se analizarán en detalle en el estudio.										
Por otro lado, se plantea ligar el desarrollo del estudio con las características del viento, es decir, tener en cuenta la variabilidad horaria como estacional de los vientos en la ciudad y se ponen en consideración por parte de la universidad, la revisión de las herramientas SCIPUFF, PHAST y TRACE.										
Por parte de la universidad, se solicita definir la cantidad de usuarios que tendrán acceso al software con el fin de generar el mismo número de permisos para su uso. La opción si no se cuenta con este dato, es que la universidad entregará el software sin restricciones al FOPAE y éste posteriormente establecerá las restricciones que considere necesarias.										
Se recuerda también que de acuerdo al cronograma, la entrega del Informe N°02 es el 01 de diciembre de 2010.										
COMPROMISOS										
ACTIVIDAD					RESPONSABLE			FECHA		
								DIA	MES	AÑO
Entrega de informe N°02					Universidad de Los Andes			01	12	2010
Definición de restricciones de uso para el software					FOPAE- Industria			15	12	2010
Envío de capas de información SIG					FOPAE- Informática			09	12	2010
PARTICIPANTES										
INVITADOS A LA REUNIÓN		AUSENCIA JUSTIFICADA		DEPENDENCIA / ENTIDAD		FIRMA DE ASISTENTES				
Diana Fonseca				Universidad de Los Andes						
Nathalia Torres				Universidad de Los Andes						
Diana Ospina				FOPAE Industria						
Piedad Camargo				FOPAE Informática						

 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>		ACTA DE REUNIÓN No. 4			CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2
					CÓDIGO DOCUMENTAL			
TEMA	Revisión versión 2 de la herramienta SIG			ÁREA RESPONSABLE	Técnica y de Gestión- Industria			
FECHA	18	03	2011	LUGAR	FOPAE-Informática	HORA	07:30 a.m.	HOJA 1 DE 1
AGENDA								
Descripción de las observaciones a la herramienta SIG vs 2 encontradas								
DESARROLLO DE LA AGENDA								
<p>Se reunieron los ingenieros Nathalia Torres, Gustavo Fuentes y Diana Ospina para la revisión de la herramienta SIG entregada por la Universidad de Los Andes en el marco del Convenio 453 de 2010. El objetivo es que la ingeniera Torres pueda apreciar sobre los equipos de la entidad, los errores que se presentan al utilizar la herramienta. Se aclara antes de iniciar la reunión, que algunas observaciones ya fueron enviadas en comunicación electrónica del 16 de marzo de 2011 y que ya han sido resueltas, como son:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Con respecto a la configuración regional, se aclara que la programación ya está construida para la configuración de idioma Español- Colombia, con el fin de evitar los conflictos en los equipos de la entidad. -Como tal configuración regional ya está corregida, todos los archivos *.txt, pueden ser cargados en ArcGIS. <p>Por parte del ingeniero Fuentes se tiene que:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Se solicita nuevamente, fijar la localización relativa de las capas con el fin de no hacer este procedimiento cada vez que se use la herramienta. -Se presentan inconvenientes en el comando "Start Editing", ya que es necesario que esté activa la barra de herramientas "Modelo Zonas Afectadas" y activas las capas "Epicentro" y "Concentración química" para que no se cierre el ArcGIS. -Se insiste en la posibilidad de generar la lista desplegable para seleccionar las capas de interés; se sugiere utilizar ArcObjects. -Se aclara que la versión de ArcGIS es 10 SP1. 								
COMPROMISOS								
ACTIVIDAD		RESPONSABLE			FECHA			
					DIA MES AÑO			
Revisar con el profesional SIG de la universidad, los errores presentados.		Universidad de Los Andes			03 2011			
PARTICIPANTES								
INVITADOS A LA REUNIÓN	AUSENCIA JUSTIFICADA	DEPENDENCIA ENTIDAD	FIRMA DE ASISTENTES					
Nathalia Torres		Universidad de los Andes	<i>Nathalia Torres</i>					
Diana Ospina		FOPAE	<i>Diana Ospina</i>					
Gustavo Fuentes		FOPAE	<i>Gustavo Fuentes</i>					

		ACTA DE REUNIÓN No. 5		CÓDIGO	PLE-FT-09	VERSIÓN	2
				CÓDIGO DOCUMENTAL			
TEMA	Revisión versión 2 de la herramienta SIG			ÁREA RESPONSABLE	Técnica y de Gestión- Industria		
FECHA	18	03	2011	LUGAR	FOPAE-Informática	HORA	07:30 a.m. HOJA 1 DE 1
AGENDA							
Descripción de las observaciones a la herramienta SIG vs 2 encontradas							
DESARROLLO DE LA AGENDA							
<p>Se reunieron los ingenieros Nathalia Torres, Gustavo Fuentes y Diana Ospina para la revisión de la herramienta SIG entregada por la Universidad de Los Andes en el marco del Convenio 453 de 2010. El objetivo es que la ingeniera Torres pueda apreciar sobre los equipos de la entidad, los errores que se presentan al utilizar la herramienta. Se aclara antes de iniciar la reunión, que algunas observaciones ya fueron enviadas en comunicación electrónica del 16 de marzo de 2011 y que ya han sido resueltas, como son:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Con respecto a la configuración regional, se aclara que la programación ya está construida para la configuración de idioma Español- Colombia, con el fin de evitar los conflictos en los equipos de la entidad. -Como tal configuración regional ya está corregida, todos los archivos *.txt, pueden ser cargados en ArcGIS. <p>Por parte del ingeniero Fuentes se tiene que:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Se solicita nuevamente, fijar la localización relativa de las capas con el fin de no hacer este procedimiento cada vez que se use la herramienta. -Se presentan inconvenientes en el comando "Start Editing", ya que es necesario que esté activa la barra de herramientas "Modelo Zonas Afectadas" y activas las capas "Epicentro" y "Concentración química" para que no se cierre el ArcGIS. -Se insiste en la posibilidad de generar la lista desplegable para seleccionar las capas de interés; se sugiere utilizar ArcObjects. -Se aclara que la versión de ArcGIS es 10 SP1. 							
COMPROMISOS							
ACTIVIDAD				RESPONSABLE		FECHA	
						DIA MES AÑO	
Revisar con el profesional SIG de la universidad, los errores presentados.				Universidad de Los Andes		03 2011	
PARTICIPANTES							
INVITADOS A LA REUNION	AUSENCIA JUSTIFICADA	DEPENDENCIA ENTIDAD	FIRMA DE ASISTENTES				
Nathalia Torres		Universidad de los Andes					
Diana Ospina		FOPAE					
Gustavo Fuentes		FOPAE					

 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>		<p>ACTA DE REUNIÓN No. <u>6</u></p>		<p>CÓDIGO PLE-FT-09</p>	<p>VERSIÓN 2</p>
		<p>CÓDIGO DOCUMENTAL</p>			
TEMA	<p>Revisión aplicativo SIG Nube Tóxica</p>		<p>AREA RESPONSABLE</p>	<p>Informática - SIG</p>	
FECHA	<p>13/04/11</p>	<p>LUGAR FOPAE - SIG</p>	<p>HORA 14:15</p>	<p>HOJA ___ DE ___</p>	
<p>AGENDA</p>					
<p>DESARROLLO DE LA AGENDA</p>					
<p>Se realizaron nuevamente las pruebas del aplicativo SIG como parte de las actividades dentro del Convenio 453 de 2010. Se corrigieron los errores sobre el archivo "Geodatabase" que consistieron en incluir la capa correspondiente a la información "Estaciones Calidad Aire", ya que se encontraba como un shapefile aparte. Se probó en los equipos de la entidad bajo ArcGIS 10, y funcionó sin ningún inconveniente. Queda pendiente la inclusión dentro del manual de usuario, indicaciones para la inclusión de una nueva capa, y la introducción de valores decimales dentro del aplicativo (uso de puntos y comas).</p>					
<p>COMPROMISOS</p>					
<p>ACTIVIDAD</p>		<p>RESPONSABLE</p>		<p>FECHA</p>	
				<p>DÍA</p>	<p>MES</p>
				<p>ANO</p>	
<p>PARTICIPANTES</p>					
<p>INVITADOS A LA REUNIÓN</p>	<p>AUSENCIA JUSTIFICADA</p>	<p>DEPENDENCIA ENTIDAD</p>	<p>FIRMA DE ASISTENTES</p>		
<p>Gustavo Alejandro Feber</p>		<p>FOPAE - SIG</p>	<p><i>[Signature]</i></p>		
<p>Angelo Blanco</p>			<p><i>[Signature]</i></p>		
<p>Claudia Moreno</p>		<p>Uniaudes</p>	<p><i>[Signature]</i></p>		
<p>Alber Moreno</p>		<p>FOPAE SIG</p>	<p><i>[Signature]</i></p>		
<p>Diana C. Ospina</p>		<p>FOPAE-Industria</p>	<p><i>[Signature]</i></p>		

12. BIBLIOGRAFÍA

Baraldi, D., Kotchourko, A., y otros. 2009. An inter-comparison exercise on CFD model capabilities to simulate hydrogen deflagrations in a tunnel. International Journal of Hydrogen Energy, 7862-7872.

Canadian Centre for Occupational Health & Safety. 2005. What is an LD50 and LC50. [En línea] 2005. [Citado el: 3 de diciembre de 2010] <http://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/ld50.html>

Casal, J. 2008. Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. Barcelona: Elsevier.

Centro Nacional de Meteorología de México (CENAM). 2010. Cálculo de la densidad del aire utilizando la formula del CIPM-2007. Centro Nacional de Meteorología de México (CENAM). [En línea] 11 de noviembre de 2010. [Citado el: 1 de mayo de 2011.] <http://www.cenam.mx/publicaciones/cdensidad.aspx>.

Crowl, D., y Louvar, J. 2002. Chemical Process Safety Fundamentals with Applications (Second edition ed.). New Jersey: Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences.

Deaves, D. 1987. Development and application of heavy gas dispersion models of varying complexity. Journal of Hazardous Materials, 427-438.

Deaves, D. 1992. Dense gas dispersion modeling. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 219-227.

Departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT), Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México (SCT), Centro de Información Química para Emergencias (CIQUIME) de Argentina. 2008. Guía de Respuesta en Caso de Emergencia (GRE) 2008.

Dillon, M. 2009. The role of deposition in limiting the hazard extent of dense-gas plumes. 164, Livermore: Elsevier, 2009, Journal of Hazardous Materials, 1293-1303.

Dolz Hnos. Cálculo de la densidad del aire (fórmula CIPM-1981/91). [En línea] [Citado el: 3 de mayo de 2011.] http://www.dolzhnos.com.ar/htm/densidad_del_aire.htm.

Dujm, N., Ott, S. y Nielsen, M. 1996. An evaluation of validation procedures and test parameters for dense gas dispersion models. Journal of Loss Prevention Process Industries, 323-338.

Eidsvik, K. J. 1980. A model for heavy gas dispersion in the atmosphere. Atmospheric Environment, 769-777.

Eisner, H. S. 1989. Workbook on the dispersion of dense gases: by R.E. Britter and J. McQuaid, Health and Safety Executive. Journal of Occupational Accidents , 149-149.

Environment Canada. 2006. National Spill Statistics and Trends. [En línea] 2006. [Citado el: 11 de noviembre de 2010] <http://www.ec.gc.ca/ee-ue/default.asp?lang=En&n=CD056AA9>

EPA. 2004. General Risk Management Program Guidance. Retrieved 2011 from Chapter 4: Offsite Consequence Analysis (PDF): <http://www.epa.gov/oem/docs/chem/Chap-04-final.pdf>

EPA. 2010. Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs) - Definitions. [En línea] 4 de agosto de 2010. [Citado el: 20 de mayo de 2011.] <http://www.epa.gov/opptintr/aegl/pubs/define.htm>.

Ermak, D. 1990. User's Manual for SLAB: An atmospheric dispersion model for denser-than-air releases. Livermore- California: Lawrence Livermore. [En línea]. 1990 [Citado el: 10 de noviembre de 2010.] http://www.sinocansystems.com.cn/FUuploadFile/EPA_MODEL/slabman.pdf.

Escalera, S. J. 2006. Técnicas de Investigación y desarrollo en Ciencias y Tecnología: guía para elaborar proyectos.

Fauske, H. 1985. Flashing flows or: Some practical guidelines for emergency releases. Plant Operations Progress, pp. 132-134.

Felder, R. 2005. Principios elementales de los procesos químicos. México : Noriega Editores, 2005.

Gexcon. 2009. CFD for consequence prediction [En línea] [Citado el: 2010.] <http://www.gexcon.com/index.cfm?id=268677>

Hanna, S., Hansen, O. y Dharmavaram, S. 2004. FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. Kennebunkport: Elsevier, 2004, Atmospheric Environment, Vol. 38, págs. 4675-4687.

Hanna, S., y otros. 2009. CFD model simulation of dispersion from chlorine railcar releases in industrial and urban areas. Kennebunkport: Elsevier, 2009, Atmospheric Environment, Vol. 43.

Holmes, N., y Morawska, L. 2006. A review of dispersion modeling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion. Atmospheric Environment, 5902-5928.

Integrated Publishing. Thermodynamic Systems and Processes. [En línea] [Citado el: 15 de Mayo de 2011.] http://www.tpub.com/content/doe/h1012v1/css/h1012v1_55.htm.

Kunsch, J. P., y Webber, D. M. 2000. Simple box model for dense-gas. Journal of Hazardous Materials, 29-46.

Lyons, William y Plisga, Gary. 2005. Standard handbook of petroleum and natural gas engineering. Oxford: s.n.

Mahieu, A., Ooms, G., y Zelis, F. 1974. The plume path theory of vent gases heavier than air. first International Loss Prevention Symposium. Hague/Delft, The Netherlands.

Mannan, S. 2005. Lee's loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment, and control. Amsterdam; Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann.

Middha, P., Hansen, O. R., y Storvik, I. E. 2009. Validation of CFD-model for hydrogen dispersion. Journal of Loss Prevention in the Process Industries , 1034-1038.

Middha, P., y Hansen, O. R. 2009. Using computational fluid dynamics as a tool for hydrogen safety studies. Journal of Loss Prevention in the Process , 295-302.

Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer. 1992. Informations sur les accidents technologiques. Recuperado el 2009, de <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>

Mohan, M., y Panwar, T. S. 1995. Development of dense gas dispersion model for emergency preparedness. Atmospheric Environment, 2075-2087.

Nitrox, C.A. 2007. Hoja de Datos de Seguridad del Material. [En línea] febrero de 2007. [Citado el: 30 de marzo de 2011.] <http://gruponitrox.com.ve/seguridad/files/Cloro.pdf>.

Ooms, G. 1972. A new method for the calculation of the plume path of gases emitted by a stack. Atmospheric Environment , 899-909.

Organización Internacional del Trabajo (OIT). 1993. Convenio sobre la prevención de accidentes industriales mayores. C174. [En línea] 2008. [Citado el: 14 de abril de 2011.] <http://www.ilo.org/ilolex/cgi-lex/convds.pl?C174>.

Red Proteger. 2009. Grandes accidentes. [En línea] 2009. [Citado el 15 de diciembre de 2010]

http://www.redproteger.com.ar/Escuela%20de%20Seguridad/Grandes_Accidentes/grandes_accidentes.htm

Revista Contacto. 2010. [En línea] 14 de septiembre de 2010. [Citado el: 10 de noviembre de 2010.]
[http://revistacontacto.uniandes.edu.co/index.php?option=com_content&view=article&id=5%3Aindustria-segura-bogota-prottegida&catid=2%3Anumero1&Itemid=2&lang=es.](http://revistacontacto.uniandes.edu.co/index.php?option=com_content&view=article&id=5%3Aindustria-segura-bogota-prottegida&catid=2%3Anumero1&Itemid=2&lang=es)

Servicio de Sanidad Ambiental, Región de Murcia. 2007. Murcia Salud. Murcia Salud. [En línea] enero de 2007. [Citado el: 20 de abril de 2011.]
[http://www.murciasalud.es/recursos/ficheros/98260-Amoniaco.pdf.](http://www.murciasalud.es/recursos/ficheros/98260-Amoniaco.pdf)

Sistema de Información para la Gestión de Riesgos y Atención de Emergencias de Bogotá (SIRE). 2006. SIRE. Autoevaluación - Registro de Planes de Emergencia y Contingencia . [En línea] 2006. [Citado el: 10 de mayo de 2011.] [http://www.sire.gov.co/portal/page/portal/sire/componentes/autoevaluacion.](http://www.sire.gov.co/portal/page/portal/sire/componentes/autoevaluacion)



Smith, J., Van Ness, H., y Abbott, M. (2005). Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. McGraw-Hill Higher Education.

Spicer, T., y Havens, J. 1989. User's Guide for the DEGADIS 2.1 Dense Gas Dispersion Model. EPA-450/4-89-019. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency.

Tauseef, S. M., Rashtchian, D. y Abbasi, S. A. 2011. CFD-based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 371-376.

The Center for Innovation in Engineering and Science Education (CIESE). Escala de Beaufort del Viento. [En línea] [Citado el: 19 de febrero de 2011.] [http://www.k12science.org/curriculum/weatherproj2/es/popup/beaufort.shtml.](http://www.k12science.org/curriculum/weatherproj2/es/popup/beaufort.shtml)

U.S Environmental Protection Agency (US EPA). 1999. Emergency management. Technical Background for Offsite Consequence Analysis for Anhydrous Ammonia, Aqueous Ammonia, Chlorine, and Sulfur Dioxide. [En línea]

 <p>ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA Fondo de Prevención y Atención de Emergencias</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ENTRE EL FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ- FOPAE Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA "MEJORAMIENTO EN EL CONOCIMIENTO EN RIESGO TECNOLÓGICO – ACCIDENTES INDUSTRIALES MAYORES EN EL DISTRITO CAPITAL. EVENTOS CON NUBE TÓXICA"</p>	 <p>Universidad de los Andes</p>
---	--	---

1999. [Citado el: 15 de abril de 2011]
<http://www.epa.gov/oem/docs/chem/backup.pdf>.

UNAM. 2005. Comité logístico permanente de protección civil y seguridad. Seminario de Atención a Emergencias Químicas. [En línea] 2005 [Citado el 30 de marzo de 2011].
http://www.iztacala.unam.mx/www_fesi/proteccioncivil/higieneysseguridad/memorias_emerg_quim/martes/1_lasemergenciasquimicasenmexico.pdf.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 2008. Facultad de Química UNAM. [En línea] 2008. [Citado el: 14 de abril de 2011.]
<http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/18amoniaco.pdf>.

van den Bosch, C. J., & W, R. A. 2005. Methods for the calculation of physical effects - due to releases of hazardous materials (liquids and gases) - 'Yellow Book'. The Hague: Committee for the Prevention of Disasters.

Welty, J. 2008. Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer. Hoboken: John Wiley, 2008.