

**PREDICCIÓN DEL VOLUMEN DE CONTAMINACIÓN GENERADO EN EL
TRANSPORTE DE LOTES SUCESIVOS DE HIDROCARBUROS A TRAVÉS DE
POLIDUCTOS**

FERNANDO CORZO ALVAREZ

JUAN CARLOS DIAZ ALVAREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS**

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

BUCARAMANGA

2009

**PREDICCIÓN DEL VOLUMEN DE CONTAMINACIÓN GENERADO EN EL
TRANSPORTE DE LOTES SUCESIVOS DE HIDROCARBUROS A TRAVÉS DE
POLIDUCTOS**

FERNANDO CORZO ALVAREZ

JUAN CARLOS DIAZ ALVAREZ

Tesis presentada como requisito para obtener el título de Ingeniero Químico

Director UIS:

CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA, M. Sc. Ing. Química

Codirectores UIS:

ARIEL FLOREZ GONZÁLEZ, Ing. Químico

JULIO CESAR CARRILLO ESCOBAR, Ph. D. en Matemáticas

JOSE CARLOS CÁRDENAS MONTES, Ing. De Petróleos

Codirector ICP:

Ingeniero de petróleos CESAR AUGUSTO GARCÍA CH.

Profesional en Ingenierías

ICP-UDE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2009

DEDICATORIA

A DIOS, por permitir que todos mis sueños se hagan realidad, por ser mi guía y mi compañero incondicional, por llevarme de la mano y nunca dejarme desfallecer en los momentos de tristeza, porque siempre has estado a mi lado como padre todo poderoso para el que nada es imposible.

A Martin corzo Jimenez (mi padre), por su amor, su apoyo y su sacrificio. por creer en mí siempre, por su ejemplo de persona trabajadora, responsable y perseverante.

A Beatriz Alvarez Torres (mi madre), por darme la vida, su amor, su entrega y sacrificio. Por su apoyo, porque con su ejemplo me ha transmitido sus sabias enseñanzas, por su preocupación y por toda su dedicación.

A María Helena, mi gran amor, por su cariño, su paciencia, por hacerme el hombre más feliz del mundo. Princesa, siempre serás una persona especial para mí, llegaste para formar parte de una etapa maravillosa en mi vida y sabes que siempre tendrás un lugar importante en mi corazón. Para ti estas líneas, porque contigo compartí mis mejores experiencias, mereces que te lleve en mis pensamientos y que te recuerde con todo mi amor.

A mis amigos y compañeros, que de una u otra forma estuvieron a mi lado en los momentos tristes y alegres, por acompañarme en esta etapa de mi vida, por ayudarme a crecer personal y profesionalmente.

Fernando Corzo Alvarez

DEDICATORIA

A DIOS, compañero fiel de mi camino, por sus bendiciones, por iluminarme en los momentos de oscuridad, por la sabiduría y el discernimiento que solo Él sabe dar por su inmenso amor.

A Esperanza Alvarez Torres (mi mamá), por darme la vida, su amor, su entrega y sacrificio. Por su apoyo, porque con su ejemplo me ha transmitido sus sabias enseñanzas, por su preocupación y por toda su dedicación.

A Juan Carlos Díaz Jaimes (mi papá), por su amor, su apoyo y su sacrificio. Por creer en mí siempre, por su ejemplo de persona trabajadora, responsable y perseverante.

A mi familia, por su apoyo y por confiar en mí.

A mis amigos y compañeros, los que fueron partícipes en mi proceso de crecimiento personal y profesional.

Juan Carlos Díaz Alvarez

AGRADECIMIENTOS

Al instituto colombiano del petróleo ICP-ECOPETROL, por la gran oportunidad de realizar nuestro proyecto de grado con ellos y para ellos.

Al grupo de investigación de la escuela de petróleos, campos maduros (GCM), en especial a la Dra. Zuly Himelda Calderón, y a los ingenieros Rubén Castro y Esperanza Cotes.... y a nuestros compañeros por brindarnos la oportunidad de trabajar junto a ellos y aprender de sus experiencias académicas.

A la universidad industrial de Santander, por nuestra formación como profesionales y personas integrales.

Al ingeniero Químico M. Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira, por su orientación, por sus enseñanzas, por la oportunidad de crecimiento personal y profesional, por su carisma, el liderazgo, el apoyo y la dedicación brindados.

Al ingeniero Ariel Florez González, por su valiosa orientación, por su dedicación y paciencia, por sus enseñanzas y la oportunidad de trabajar a su lado y aprender de su experiencia.

Al ingeniero Cesar Augusto García, por su apoyo en la revisión y adecuación de este proyecto.

Al Ph.D. en matemáticas Julio Cesar Carrillo, por sus invaluable aportes, dedicación, por sus sugerencias y recomendaciones.

Al ingeniero José Carlos Cárdenas, por sus aportes, conocimientos, y orientación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CONCEPTOS TEÓRICOS	2
1.1 Definición y descripción del proceso de mezclado en el sistema de transporte por flujo "batch"	2
1.2 Planteamiento del modelo	3
1.2.1 Desarrollo del modelo matemático	5
1.2.2 Coeficiente de dispersión axial	6
2. RESOLUCION DEL MODELO MATEMATICO PROPUESTO	8
2.1 Coeficiente de dispersión axial constante (alternativa 1)	8
2.2 Coeficiente de dispersión axial variable (alternativa 2)	9
2.3 Determinación del volumen de mezcla	11
2.4 Desarrollo de la simulación numérica	12
2.4.1 Alternativa 1 (ecuación (15))	12
2.4.2 Alternativa 2 (ecuación (28))	14
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	16
3.1 Caso de estudio	16
3.1.1 Análisis de las alternativas de solución	16
3.2 Tiempos de corte	18
3.3 Análisis de los parámetros del sistema en el crecimiento del volumen de contaminación	20
3.3.1 Variación de la velocidad de flujo con diámetro constante	21
3.3.2 Variación del diámetro de la tubería con caudal constante	22

3.3.3	Longitud recorrida por los fluidos con velocidad y diámetro constantes	23
3.4	Cuantificación del efecto que los parámetros del sistema ejercen sobre el volumen de mezcla	24
4.	CONCLUSIONES	26
5.	RECOMENDACIONES	27
	BIBLIOGRAFIA	28
	ANEXOS	30

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación esquemática de una instalación para la transferencia en flujo batch.	2
Figura 2. Bosquejo de los perfiles de velocidad de los fluidos que conforman el sistema de flujo batch.	3
Figura 3. (Arriba) evolución de la región de mezcla en el transporte mediante flujo batch, (abajo) perfil de concentraciones obtenido a lo largo de la tubería.	4
Figura 4. Caracterización del volumen de mezcla en $x = x_i$ a diferentes instantes de tiempo t_{BA} y t_{AB} ($t_{AB} > t_{BA}$).	12
Figura 5. Desplazamiento hacia atrás del perfil de concentraciones. Obsérvese que $t_m > t_1 > t_2$ y que $0,5 > C_1 > C_2$.	13
Figura 6. Desplazamiento hacia adelante del perfil de concentraciones. Obsérvese que $t_m < t_1 < t_2$ y que $0,5 < C_1 < C_2$.	13
Figura 7. Comparación entre los resultados experimentales del caso de estudio y los arrojados por la simulación numérica a una distancia de 135 900 m.	17
Figura 8. Comparación entre los resultados experimentales del caso de estudio y los arrojados por la simulación numérica a una distancia de 199 900 m.	18

Figura 9. Resultados para los tiempos de corte a diferentes concentraciones admisibles en el punto de medición de 135 900 [m].	19
Figura 10. Resultados para los tiempos de corte a diferentes concentraciones admisibles en el punto de medición de 199 900 [m].	20
Figura 11. Efecto de la velocidad en el crecimiento del volumen de contaminación. (La línea negra corresponde a los datos obtenidos en la simulación para el caso de estudio).	21
Figura 12. Efecto del diámetro de la tubería en el volumen de contaminación (La línea negra corresponde a los datos obtenidos en la simulación para el caso de estudio).	22
Figura 13. Efecto de la longitud recorrida por los fluidos en el volumen de contaminación. (Las distancias que se suponen como puntos de medición (x) se encuentran equiespaciadas).	23
Figura 14. Comparación de los resultados obtenidos mediante la incorporación a la solución del modelo usando la alternativa 1.	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Coeficientes de dispersión axial más utilizados en función del número de Reynolds.	7
Tabla 2. Propiedades de los fluidos y condiciones de operación el caso base.	16
Tabla 3. Efecto de los parámetros involucrados en el sistema sobre el volumen de contaminación (Los niveles inferior y superior del diámetro de la tubería son 0,2032 [m] (8 in) y 0,254 [m] (10 in) respectivamente).	24
Tabla 4. Efecto de los parámetros involucrados en el sistema sobre el volumen de contaminación (Los niveles inferior y superior del diámetro de la tubería son 0,254 [m] (10 in) y 0,3048 [m] (12 in) respectivamente).	25
Tabla 5. Efecto de los parámetros involucrados en el sistema sobre el volumen de contaminación (Los niveles inferior y superior del diámetro de la tubería son 0,3048 [m] (12 in) y 0,3556 [m] (14 in) respectivamente).	25
Tabla 6. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 10% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].	48
Tabla 7. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 9% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].	48

Tabla 8. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 8% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].	49
Tabla 9. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 7% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].	49
Tabla 10. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 6% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].	50
Tabla 11. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 5% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].	50
Tabla 12. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 4% [p/p] . D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].	51
Tabla 13. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 3% [p/p] . D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].	51
Tabla 14. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 2% [p/p] . D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].	52

Tabla 15. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 1% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].	52
Tabla 16. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 10% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].	53
Tabla 17. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 9% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].	53
Tabla 18. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 8% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].	54
Tabla 19. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 7% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].	54
Tabla 20. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 6% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].	55
Tabla 21. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 5% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].	55

Tabla 22. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 4% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].	56
Tabla 23. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 3% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].	56
Tabla 24. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 2% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].	57
Tabla 25. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 1% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].	57
Tabla 26. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 10% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].	58
Tabla 27. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 9% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].	58
Tabla 28. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 8% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].	59

Tabla 29. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 7% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].	59
Tabla 30. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 6% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].	60
Tabla 31. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 5% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].	60
Tabla 32. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 4% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].	61
Tabla 33. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 3% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].	61
Tabla 34. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 2% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].	62
Tabla 35. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 1% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].	62
Tabla 36. Efecto de la interacción entre los parámetros del sistema para una concentración admisible de 10% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).	63

Tabla 37. Efecto de la interacción entre los parámetros del sistema para una concentración admisible de 9% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).	63
Tabla 38. Efecto de la interacción entre los parámetros del sistema para una concentración admisible de 8% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).	64
Tabla 39. Efecto de la interacción entre los parámetros del sistema para una concentración admisible de 7% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).	64
Tabla 40. Efecto de la interacción entre los parámetros del sistema para una concentración admisible de 6% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).	64
Tabla 41. Efecto de la interacción entre los parámetros del sistema para una concentración admisible de 5% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).	64
Tabla 42. Efecto de la interacción entre los parámetros del sistema para una concentración admisible de 4% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).	65
Tabla 43. Efecto de la interacción entre los parámetros del sistema para una concentración admisible de 3% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).	65
Tabla 44. Efecto de la interacción entre los parámetros del sistema para una concentración admisible de 2% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).	65
Tabla 45. Efecto de la interacción entre los parámetros del sistema para una concentración admisible de 1% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).	65
Tabla 46. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 10% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).	66

Tabla 47. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 9% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).	66
Tabla 48. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 8% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).	66
Tabla 49. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 7% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).	66
Tabla 50. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 6% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).	67
Tabla 51. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 5% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).	67
Tabla 52. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 4% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).	67
Tabla 53. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 3% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).	67
Tabla 54. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 2% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).	68
Tabla 55. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 1% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).	68
Tabla 56. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 10% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).	68

Tabla 57. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 9% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).	68
Tabla 58. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 8% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).	69
Tabla 59. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 7% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).	69
Tabla 60. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 6% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).	69
Tabla 61. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 5% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).	69
Tabla 62. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 4% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).	70
Tabla 63. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 3% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).	70
Tabla 64. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 2% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).	70
Tabla 65. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 1% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).	70

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Desarrollo matemático de las alternativas de solución Propuestas.	31
ANEXO B. Algoritmos	37
ANEXO C. Comparación entre los datos experimentales del caso de estudio y los resultados obtenidos por el modelo con las expresiones para la determinación del coeficiente de dispersión axial dados en la tabla 1.	45
ANEXO D. Datos de un diseño factorial 2^3 : efecto de las variables (velocidad de flujo, diámetro y longitud de la tubería) sobre el volumen de mezclado.	47

RESUMEN

TÍTULO: “PREDICCIÓN DEL VOLUMEN DE CONTAMINACIÓN GENERADO EN EL TRANSPORTE DE LOTES SUCESIVOS DE HIDROCARBUROS A TRAVÉS DE POLIDUCTOS”*

AUTORES: FERNANDO CORZO ALVAREZ**, JUAN CARLOS DÍAZ ALVAREZ**

PALABRAS CLAVE: Modelo matemático, balance de masa, coeficiente de dispersión axial, transporte de lotes sucesivos de fluidos, poliducto.

CONTENIDO:

En este trabajo se proponen dos herramientas computacionales para predecir a diferentes concentraciones admisibles, el volumen de mezclado que se genera entre dos hidrocarburos transportados sucesivamente a través de poliductos; tales programas, son el producto de la resolución de dos modelos matemáticos (uno lineal y otro no lineal) obtenidos de un balance de masa realizado en la interfase de los fluidos y de la introducción de un parámetro conocido como coeficiente de dispersión axial; el cual, se determina a través de expresiones semiempíricas en función de la naturaleza de los fluidos y del régimen de flujo. Luego de que dichas correlaciones fueron incorporadas a cada una de las herramientas propuestas, se encontró que el empleo de las ecuaciones desarrolladas por Sjenitzer para el caso lineal y Krantz and Wasan para el caso no lineal, conlleva a un mejor ajuste con los datos experimentales reportados en la literatura para un sistema gasolina-diesel, siendo esto a su vez el criterio suficiente para establecer los tiempos requeridos en los que la separación de los lotes de los fluidos debe llevarse a cabo, de forma tal que se garantice su almacenamiento con las especificaciones técnicas requeridas. Finalmente, con la realización de un análisis estadístico se demostró de manera cuantitativa, que un aumento o disminución en el diámetro de la tubería ejerce un mayor efecto sobre el volumen de contaminación, en comparación con un aumento o disminución en la magnitud de los demás parámetros del sistema tales como la velocidad de flujo y la longitud de la tubería.

*Trabajo de investigación

**Facultad de ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química.

Director: Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirectores: Ariel Florez González, Julio Cesar Carrillo Escobar, Jose Carlos Cárdenas Montes. Codirector (ICP): Cesar Augusto García Chinchilla

ABSTRACT

TITLE: "PREDICTING OF CONTAMINATION VOLUME GENERATED IN HYDROCARBONS SUCCESSIVE LOT TRANSPORTATION THROUGH POLYDUCTS"*

AUTHORS: FERNANDO CORZO ALVAREZ**, JUAN CARLOS DÍAZ ALVAREZ**

KEYWORDS: Mathematic model, mass balance, axial dispersion coefficient, successive lots transportation, polyduct.

CONTENT:

In this work, two computational tool are proposed to predict the mixture volume generated between two hydrocarbons with different concentrations, successively transported trough polyducts; these softwares are the product of the solution of two mathematic models linear and nonlinear ones, obtained from a mass balance made in the interface of the fluids and using a parameter known as axial dispersion coefficient; which is determined by mean of semi-empiric expressions in function of the fluids nature and flow rate. Incorporating these correlations to each one of the proposed tools, it was found that the use of the equations developed by Sjenitzer for lineal cases and Krantz & Wasan for the nonlinear cases, results in a better fit to the experimental data reported in the literature for a diesel-gasoline system. Parallels it's a sufficient criterion to establish the required times to make the separation of the fluid lots in such a way their storage with the required technical specifications should be guaranteed. Finally, the development of a statistical analysis demonstrated, quantitatively, that a variation in the diameter of the pipes causes more effect in the predicted contamination volume than a variation in the magnitude of the other parameters of the system such as flow velocity and pipe length.

*Investigation work

**Physicochemical faculty, Chemical Engineering School.

Director: Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirectors: Ariel Florez González, Julio Cesar Carrillo Escobar, Jose Carlos Cárdenas Montes. Codirector (ICP): Cesar Augusto García Chinchilla

INTRODUCCIÓN

El sistema de transporte de lotes sucesivos de hidrocarburos a través de poliductos, desde la refinería hasta los sitios de distribución, es ampliamente utilizado para enviar diferentes tipos de combustible tales como gasolina, queroseno, diesel, jet, etc. Por tanto, la conveniencia del uso de esta técnica se debe a que no sería económicamente viable utilizar tuberías paralelas dedicadas a transportar un solo tipo de fluido; sin embargo, realizar este proceso repercute en la calidad y especificaciones de los productos transportados, ya que se genera una zona de mezclado o volumen de contaminación en la interfase de las sustancias allí presentes debido a fenómenos de transferencia de masa; los cuales, con la ausencia de un medio eficaz para separar los productos dados van incrementando dicha zona a lo largo de la tubería.

En la actualidad, la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL S.A.), no cuenta con una herramienta que permita estimar de forma segura el volumen de contaminación entre los hidrocarburos transportados a través de los poliductos y sus respectivos tiempos de corte, por lo que debe realizar las separaciones de los lotes mediante mediciones continuas de densidad. De acuerdo con lo anterior, se hace necesario plantear un modelo matemático que estime la zona de mezclado interfacial de los fluidos involucrados en el sistema, con el objetivo de identificar los parámetros que puedan disminuir dicho volumen y de determinar los tiempos requeridos para separar estos fluidos en el punto de recepción, logrando así el almacenamiento de los hidrocarburos con las especificaciones requeridas para realizar un posterior proceso de separación.

Un valor agregado de este trabajo, es la posible utilización de las ecuaciones obtenidas del modelo matemático en el transporte de crudos pesados; pues es de destacar que en este país, el envío de estos fluidos a través de los oleoductos se lleva a cabo de una manera muy similar a la anteriormente descrita.

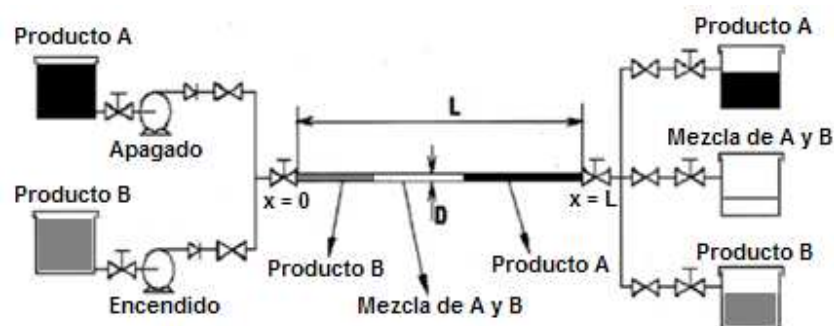
1. CONCEPTOS TEÓRICOS

En este capítulo se pretende brindar los conceptos necesarios, referentes a los diferentes fenómenos de transferencia de masa que se presentan en el transporte de fluidos a través de lotes sucesivos. Estos conceptos, servirán como base para plantear un modelo matemático que prediga la distribución de concentraciones en el sistema en función del tiempo y la distancia recorrida en el poliducto. Finalmente, se muestra una lista de las correlaciones más utilizadas para calcular el coeficiente de dispersión axial; el cual, es de gran importancia en la predicción del volumen de contaminación.

1.1 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MEZCLADO EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE POR FLUJO “BATCH”

El transporte mediante flujo batch se realiza enviando por una misma tubería, dos o más lotes de fluidos de manera sucesiva (cada uno de ellos con características diferentes). Para explicar mejor este proceso, considérese el esquema de instalación de la tubería que se presenta en la figura 1.

Figura 1. Representación esquemática de una instalación para la transferencia en flujo batch.



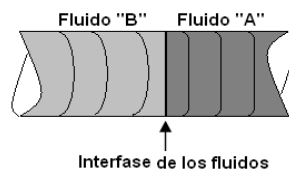
Fuente: Modificado de [11].

Dicho sistema es usado para bombear secuencialmente dos productos miscibles y distintos denotados como “A” y “B”. La tubería tiene un diámetro D y una longitud

L, la cual es medida desde la unión de la línea de descarga de la bomba hasta el punto de recepción al final de la tubería. Mediante el uso de una válvula de desvío, en el instante de tiempo $t=0$, el bombeo de fluido "A" es interrumpido y en el mismo instante de tiempo inicia el bombeo del fluido "B"; de esta manera el fluido "B" empieza a desplazar el fluido "A" a lo largo de la tubería y así los dos fluidos son transportados uno seguido del otro.

En el paso de productos a través de la tubería, una zona de mezcla es generada en las fronteras de los dos fluidos adyacentes (Fluidos "A" y "B"); la presencia de esta región, es consecuencia de la difusión convectiva¹, la cual depende en gran medida del cambio de la forma del perfil de velocidades que se presenta en la interfase de los fluidos (Véase figura 2). Por consiguiente, "cuanto más cercanamente, el perfil de velocidad se aproxime al de flujo tapón, la cantidad de mezcla axial es más pequeña" [1, 18, 19, 20].

Figura 2. Bosquejo de los perfiles de velocidad de los fluidos que conforman el sistema de flujo batch.



Fuente: Autores del proyecto

Por último, cuando la zona de mezcla llega al final de la tubería es redireccionada a través de válvulas de desvío, de forma tal que pueda ser separada de los demás fluidos y de esta manera puedan ser almacenados el fluido "A", el fluido "B" y la mezcla entre ellos en sus respectivos contenedores.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL MODELO FENOMENOLÓGICO

Para generar el respectivo modelo matemático, considérese un sistema de flujo batch compuesto por dos productos denotados como "A" y "B", siendo "B" el fluido

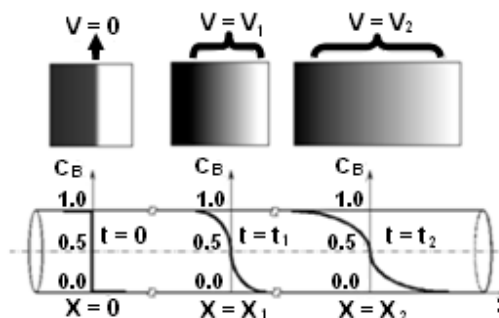
¹ Aunque en estos sistemas se presentan fenómenos de transferencia de masa asociados a la difusión molecular y turbulenta, sus efectos sobre el volumen de mezcla son despreciables [15].

desplazante y “A” el fluido desplazado. Además, defínase las siguientes variables como sigue:

- ✓ t como la variable de tiempo [s]
- ✓ x es la coordenada axial de la línea que inicia en la zona de descarga de los fluidos $x=0$ y finaliza en el punto de recepción denotado como $x=L$, [m].
- ✓ $C_i(x,t) \in [0, 1]$ con $i \in \{A, B\}$, es la concentración media del fluido i dentro de la mezcla en la sección transversal de la tubería en un tiempo t y la coordenada axial $x \in [0,L]$, [p/p].
- ✓ $x_m(t)$ es el punto medio de la mezcla², [m].

Ahora bien; cuando $i=B$, el perfil de concentración puede ser representado a lo largo de la tubería, como se ilustra en la figura 3. En esta figura se aprecia que al inicio de la transferencia de masa ($x=0$ y $t=0$), aún no se presenta una cantidad apreciable de volumen de mezclado y es por esto que en la interfase de los dos fluidos, el perfil de concentraciones presenta un cambio súbito de 1 a 0% [p/p]; posteriormente, a medida que los fluidos se desplazan a lo largo de la tubería, el volumen de mezclado se va incrementando y con ello, el perfil de concentraciones se extiende cada vez más, tanto hacia adelante como hacia atrás del punto medio de la mezcla.

Figura 3. (Arriba) evolución de la región de mezcla en el transporte mediante flujo batch, (abajo) perfil de concentraciones obtenido a lo largo de la tubería.



Fuente: modificado de [3].

² El punto medio de la mezcla se refiere al punto en donde $C_B[X=X_m(t),t] = C_A[X=X_m(t),t] = 0,5$

1.2.1 Desarrollo del modelo matemático. El modelo matemático a desarrollar comprende las siguientes suposiciones:

- ✓ Los fluidos que comprenden el sistema son incompresibles.
- ✓ Las paredes de las tuberías son rígidas.
- ✓ La velocidad media de flujo es igual para todos los fluidos, incluyendo la zona de mezcla.
- ✓ La tubería por donde se transportan los fluidos es horizontal.
- ✓ La velocidad media de flujo es constante y el régimen de flujo es turbulento.
- ✓ El diámetro de la tubería es constante.
- ✓ La transferencia de masa ocurre sólo en dirección axial, pues debido al régimen de flujo, los efectos debido a la transferencia en dirección radial se consideran despreciables.
- ✓ El sistema es isotérmico
- ✓ Se considera que la tubería es lisa y que no posee accesorios tales como válvulas, codos, y/o cualquier otro dispositivo que pueda generar pérdidas por fricción.
- ✓ El modelo es aplicable siempre y cuando no existan paradas en los sistemas de bombeo.
- ✓ No existen estaciones de bombeo intermedias a lo largo del poliducto.
- ✓ El intervalo sobre el número de Reynolds para el cual el modelo es aplicable está dado por el coeficiente de dispersión axial.
- ✓ Los efectos de transferencia de masa debido a la presencia de las subcapas laminar y de transición se consideran despreciables.

De acuerdo con lo expuesto en la sección 1.1 y las suposiciones anteriormente realizadas, las ecuaciones que describen el fenómeno de mezclado son:

$$U_z = \frac{Q}{a} \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + U_Z \frac{\partial c_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(C_i) \frac{\partial c_i}{\partial x} \right] \quad (2)^3$$

Donde Q es el caudal [m^3/s], a es el área de la sección transversal de la tubería [m^2] y $K(C_i)$ es el coeficiente de dispersión axial [m^2/s]; este último parámetro es el que determina la dispersión de una sustancia en otra bajo la acción combinada de la difusión molecular y la variación de la velocidad sobre la sección transversal de la tubería [17, 18, 19,]. La expresión (1) para efectos prácticos, proviene de definir la velocidad media (U_Z) en términos del caudal de fluido; y la ecuación (2) proviene de un balance de masa en la interfase de los lotes de los fluidos a lo largo de la tubería. Considerando que los fluidos “A” y “B” son bombeados secuencialmente de tal manera que “A” es seguido por “B” y que la siguiente relación deber ser siempre sostenida [3, 4, 11]:

$$C_A + C_B = 1 \quad (3)$$

Las condiciones iniciales y de frontera para la ecuación (2) están dadas de acuerdo al caso $i = A$ o $i = B$ [8]:

$$i = B, \begin{cases} CI: C_B(x > 0, t = 0) = 0 \\ CL1: C_B(x = 0, t \geq 0) = C_{B0} = 1 \\ CL2: C_B(x = +\infty, t \geq 0) = 0 \end{cases} \quad (4) \quad \text{ó} \quad i = A, \begin{cases} CI: C_A(x > 0, t = 0) = 1 \\ CL1: C_A(x = 0, t \geq 0) = C_{A0} = 0 \\ CL2: C_A(x = -\infty, t \geq 0) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

1.2.2 Coeficiente de dispersión axial. En cuanto al coeficiente de dispersión axial cabe destacar que existe una serie de correlaciones para determinar dicho parámetro; sin embargo, muchas de ellas requieren datos experimentales de gran complejidad debido a la naturaleza de los fluidos que componen el sistema. Por tanto, en este trabajo se ha decidido probar con aquellas expresiones semiempíricas para las cuales, el coeficiente de dispersión axial se determina a través del número de Reynolds (Ver tabla 1).

³ Esta expresión puede ser obtenida de las ecuaciones de Navier-Stokes y se encuentra también en [3, 11, 17].

Tabla1. Coeficientes de dispersión axial más utilizados en función del número de Reynolds.

Coeficiente de dispersión axial para tubería lisa	Restricciones	Ref.
$K = D * U_z * 0,2828 * Re^{-0,25}$	$Re > 20\ 000$	[18]
$K = D * U_z * 0,803 * Re^{-0,136}$	$Re > 2\ 000$	[11]
$K = D * U_z * 3,19 * Re^{-0,2}$	$Re > 10^4 * e^{1,52*d^{0,5}}$	[1]
$K = \frac{D}{2} * U_z * 2\ 592 * Re^{-0,9} * \left(\frac{2 * L}{D}\right)^{0,141}$	$1,52 < L < 8,5 * 10^5 [m]$ $0,314 < D < 101,6 [cm]$ $3\ 000 < Re < 482\ 000$	[10]
$\log_{10} K = \frac{1,6098788}{Re^{0,2987}} * \log_{10} L + 0,8172$ $* \log_{10} Re - 5,7811$	$Re > 10\ 000$	[2]
D es diámetro de la tubería [in] ; L es la longitud de la tubería [m]		

Fuente: Autores del proyecto.

En las expresiones dadas en la anterior tabla, el número de Reynolds, se determina mediante valores de viscosidad cinemática ν [m^2/s] como sigue:

$$Re = \frac{D * U_z}{\nu} \quad (6)$$

Donde D es el diámetro de la tubería [m], y ν es la viscosidad cinemática de la mezcla [m^2/s], determinada por la correlación propuesta por Gambill [12]:

$$\nu = (C_A * \nu_A^{1/3} + C_B * \nu_B^{1/3})^3 \quad (7)$$

Donde ν_i ($i = "A"$ o $i = "B"$) es la viscosidad cinemática del fluido i [m^2/s]. Por último, con el modelo matemático obtenido y las diferentes expresiones propuestas para calcular el coeficiente de dispersión axial, es posible determinar el perfil de concentraciones en la interfase de los dos fluidos a lo largo de la tubería en función del tiempo y la distancia. Con esto y mediante las ecuaciones que se presentarán en el siguiente capítulo, se determinará el volumen de mezclado para un cierto grado de concentración de fluido "B" en "A" o viceversa.

2. RESOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO

En este capítulo se presentan dos alternativas de solución para el balance de masa propuesto en la ecuación (2). En la primera, se considera un coeficiente de dispersión axial constante; y en la segunda, se asume que este parámetro varía con la concentración. Como se verá a continuación, estas consideraciones repercuten tanto en la resolución del modelo como en el aumento del grado de complejidad en la obtención de los resultados.

2.1 COEFICIENTE DE DISPERSIÓN AXIAL CONSTANTE (ALTERNATIVA 1)

Para considerar el coeficiente dispersión axial constante es necesario fijar las concentraciones de los fluidos a un valor de 0,5 (es decir, $C_A = C_B = 0,5$), con esto, la ecuación (2) adopta la siguiente forma:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + U_z \frac{\partial C_i}{\partial x} = K \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} \quad (8)$$

Para el caso en el que $i = B$, se toman las condiciones iniciales y de frontera dadas en (4). Mediante la sustitución de las siguientes variables adimensionales [9]:

$$J = \frac{C_B}{C_{B0}} \quad (9) \quad \text{y} \quad \varphi = \frac{x - U_z * t}{\sqrt{4 * K * t}} \quad (10)$$

La ecuación (8) se convierte en (véase Anexo A1):

$$2 * \varphi * \psi + \psi' = 0 \quad (11)$$

Siendo

$$\psi = \frac{\partial J}{\partial \varphi} \quad (12)$$

Resolviendo la ecuación (11) con las nuevas condiciones límite⁴:

$$\varphi = 0 \quad J = 0,5 \quad (13)$$

$$\varphi = \infty \quad J = 0 \quad (14)$$

Se llega a la siguiente expresión matemática:

$$\frac{C_B}{C_{B0}} = 0,5 * \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - U_z * t}{\sqrt{4 * K * t}} \right) \right) \quad (15)$$

La anterior ecuación representa un bajo grado de complejidad en cuanto a su aplicación, ya que fijando la variable t es posible utilizar la variable x para recorrer una determinada zona de la tubería y de esta manera determinar el perfil de concentraciones.

2.2 COEFICIENTE DE DISPERSIÓN AXIAL VARIABLE (ALTERNATIVA 2)

Con en el fin de facilitar el tratamiento matemático de la ecuación (2) junto con la ecuación (4) o (5) se realiza el siguiente cambio de variables [3, 4, 11]:

$$y = \frac{x}{D} - \tau \quad (16) \quad y \quad \tau = \frac{U_z * t}{D} \quad (17)$$

Para obtener una EDP no lineal (Véase Anexo A2):

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\kappa(C_i) \frac{\partial C_i}{\partial y} \right] \quad (18)$$

Siendo

$$\kappa(C_i) = \frac{K}{D * U_z} \quad (19)$$

Sujeta a las condiciones:

⁴ La condición de $J = 0,5$ se debe a que en $\varphi = 0$ la coordenada x corresponde al punto medio de la mezcla es decir $x = V_z * t$; sitio en el cual tanto la concentración de "A" en "B" como la de "B" en "A" son iguales a 0,5

$$i = A, \begin{cases} C_A(y, \tau) = C_A(y = 0, \tau \geq 0) = C_{A0}^* = 0,5 \\ C_A(y, \tau) = C_A(y > 0, 0) = 1 \\ C_A(y, \tau) = C_A(\infty, \tau > 0) = C_{A\infty} = 1 \end{cases} \quad (20)$$

ó

$$i = B, \begin{cases} C_B(y, \tau) = C_B(y = 0, \tau \geq 0) = C_{B0}^* = 0,5 \\ C_B(y, \tau) = C_B(y > 0, 0) = 0 \\ C_B(y, \tau) = C_B(\infty, \tau > 0) = C_{B\infty} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

Nuevamente, mediante el siguiente cambio de variables [10]:

$$J = \frac{C_B}{C_{B0}^*} \quad (22) \quad y \quad \eta = \frac{y}{\sqrt{4 * \kappa(C_{B0}^*) * \tau}} \quad (23)$$

Se obtiene la siguiente EDO no lineal (véase Anexo A3):

$$\frac{d}{d\eta} \left[K^*(J) \frac{dJ}{d\eta} \right] + 2\eta \frac{dJ}{d\eta} = 0 \quad (24)$$

Donde

$$K^*(J) = \frac{\kappa(C_i)}{\kappa(C_{B0}^*)} \quad (25)$$

Con las nuevas condiciones de frontera:

$$J(\infty) = 0; \quad J(0) = 1 \quad (26)$$

Obteniéndose de esta manera la solución de la ecuación (24) (véase Anexo A4):

$$J(\eta) = B + A \int_0^\eta \left[\frac{1}{K^*(J(\xi))} \exp \left(- \int_0^\xi \frac{2z}{K^*(J(z))} dz \right) \right] d\xi = B + Af(\eta) \quad (27)$$

Siendo B y A constantes, generadas en el proceso de solución. Aplicando las respectivas condiciones de frontera establecidas en (26), es necesario que en $J(0) = 1$, $B = 1$ y que en $J(\infty) = 0$, $A = -1/f(\infty)$. De esta forma es posible reescribir la ecuación (27) de la siguiente manera:

$$J(\eta) = \frac{C_B}{C_{B0}^*} = 1 - \frac{f(\eta)}{f(\infty)} \quad (28)$$

La expresión (28) posee un alto grado de complejidad en comparación con la ecuación (15), ya que para hallar el perfil de concentraciones a partir del punto medio de la mezcla, es necesario determinar $f(\infty)$ y luego, suponer un valor de concentración en $f(\eta)$ de forma tal que este y su correspondiente valor calculado sean menores o iguales a $1 \cdot 10^{-3}$.

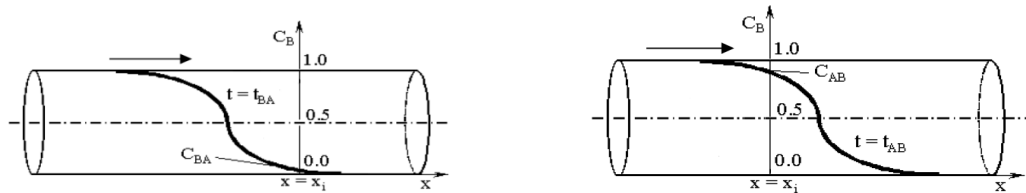
2.3 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE MEZCLA

De acuerdo con [4] y [11], el volumen de mezcla puede solamente ser evaluado al momento en el que el perfil de concentraciones se aproxima al punto de medición ($x = x_i$) de manera tal que allí, la concentración de producto "B" en "A" al inicio de la zona de mezcla, y la concentración de producto "A" en "B" al final de esta, correspondan con sus valores de concentración admisible C_{BA} y C_{AB} , respectivamente (véase la figura 4). Una vez que esta etapa del proceso ha sido terminada, se obtienen los tiempos correspondientes a los valores de concentración especificados anteriormente (t_{BA} y t_{AB}), con el fin de calcular el volumen de mezcla de acuerdo con:

$$V_C(x = L) = a * U_Z * (t_{AB} - t_{BA}) \quad (29)$$

En donde t_{BA} es el primer tiempo de corte [s], el cual se define como el instante de tiempo asociado al arribo del inicio de la zona de mezcla con concentración C_{BA} en $x = x_i$ y t_{AB} es el segundo tiempo de corte, definido como el instante de tiempo asociado con el arribo del final de la zona de mezcla con concentración C_{AB} en $x = x_i$.

Figura 4. Caracterización del volumen de mezcla en $x = x_i$ a diferentes instantes de tiempo t_{BA} y t_{AB} ($t_{AB} > t_{BA}$).



Fuente: Modificado de [3, 4 ,11].

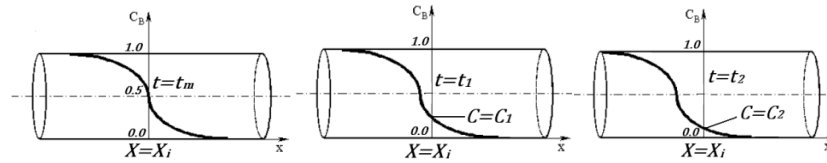
2.4 DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

Debido a que las soluciones de las alternativas planteadas anteriormente difieren una de la otra, se hace necesario realizar una descripción detallada acerca del funcionamiento de cada uno de los respectivos programas realizados en SCILAB 5.0, con el fin de determinar el perfil de concentraciones y calcular el volumen de mezcla.

2.4.1 Alternativa 1 (ecuación (15)). El programa desarrollado para la ecuación (15) (véase Anexo B1), inicia asignándole a la variable t el valor correspondiente al cálculo del tiempo medio⁵; el cual, irá decreciendo en un segundo a medida que se hace un recorrido mediante el uso de la variable x a lo largo de una zona ampliamente acotada alrededor del punto de medición, garantizándose de esta manera que el perfil de concentraciones sea determinado en su totalidad. Con la anterior metodología se busca que la curva obtenida del perfil de concentraciones se desplace hacia atrás, de forma tal que el valor de concentración calculado en el correspondiente punto de medición sea aproximadamente igual al valor de C_{BA} (Véase la figura 5).

⁵ El tiempo medio corresponde al tiempo en el cual la concentración de la mezcla es 0,5 [p/p] en el punto de medición; se calcula como $t_m = \frac{b}{V_z}$ donde b es el punto de medición y V_z la velocidad media de flujo.

Figura 5. Desplazamiento hacia atrás del perfil de concentraciones. Obsérvese que $t_m > t_1 > t_2$ y que $0,5 > C_1 > C_2$.

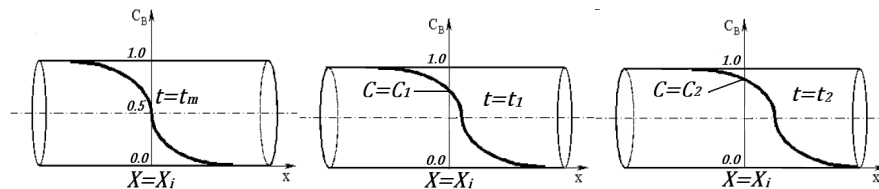


Fuente: Autores del proyecto.

Una vez culminado el anterior proceso se toma el valor de t correspondiente al primer tiempo de corte (t_{BA}). Posteriormente, se realiza un procedimiento similar al anteriormente descrito, teniendo en cuenta que la variable t inicia nuevamente desde el tiempo medio, aumentándose cada segundo y realizando el mismo recorrido para la variable x . Esto hace que la curva del perfil de concentraciones se mueva hacia delante de forma tal que el valor de la concentración correspondiente al punto de medición, sea aproximadamente igual al valor de C_{AB} (véase la figura 6).

Finalmente, terminada esta segunda fase del proceso, se toma el nuevo valor de t correspondiente al segundo tiempo de corte (t_{AB}). Con este resultado y con el valor del tiempo para el primer corte, se procede a calcular el volumen de contaminación utilizando la ecuación (29).

Figura 6. Desplazamiento hacia adelante del perfil de concentraciones. Obsérvese que $t_m < t_1 < t_2$ y que $0,5 < C_1 < C_2$.



Fuente: Autores del proyecto.

Finalmente, terminada esta segunda fase del proceso, se toma el nuevo valor de t correspondiente al segundo tiempo de corte (t_{AB}). Con este resultado y con el

valor del tiempo para el primer corte, se procede a calcular el volumen de contaminación utilizando la ecuación (29).

2.4.2 Alternativa 2 (ecuación (28)). Para determinar el perfil de concentraciones haciendo uso de la ecuación (28) (véase Anexo B2), se debe calcular inicialmente $f(\infty)$; para esto, es necesario partir de un valor relativamente grande para η (1000 por ejemplo) y evaluar la siguiente expresión para $f(\eta)$ dada en su forma numérica⁶:

$$f(\eta) = \frac{\eta}{2N} \left[2 \left(\frac{1}{K^*(C_B(\eta))} \exp \left(-\frac{\eta}{2N} \left[2 \frac{2\eta}{K^*(C_B(\eta))} + \sum_{l=h^*}^{l=\eta-h^*} \frac{2l}{K^*(C_B(l))} \right] \right) \right) + 2 \frac{1}{K^*(C_B(0))} + \sum_{i=h}^{i=\eta-h} \frac{1}{K^*(C_B(i))} \exp \left(-\frac{i}{2N} \left[2 \frac{2i}{K^*(C_B(i))} + \sum_{j=h^*}^{j=i-h^*} \frac{2j}{K^*(C_B(j))} \right] \right) \right] \quad (30)$$

Una vez realizado el anterior cálculo, se evalúa en (30) otro valor de η (mayor que el anterior) y se revisa que este resultado sea aproximadamente igual al calculado previamente; si esto no se cumple, se utiliza un nuevo valor de η y se continúa el proceso hasta que la diferencia entre el resultado dado por este y el anteriormente obtenido sea aproximadamente igual a cero. Luego de calcularse $f(\infty)$, se parte del tiempo medio y se utiliza la variable x con el fin de recorrer cada posición de la tubería suponiendo simultáneamente un valor de concentración para estimar el lado derecho de la ecuación (28), realizando este paso un cierto número de veces, de manera tal que la concentración supuesta sea aproximadamente igual a la calculada (lado izquierdo de la ecuación (28)) para cada x y t . El anterior proceso se lleva a cabo de manera iterativa hasta formar un perfil de concentraciones en función de la distancia a un tiempo determinado; el cual, debe ser comparado con

⁶ Para transformar las integrales a términos de sumatoria se utilizó la técnica de integración numérica por el método de trapecios.

el valor correspondiente a la concentración admisible en el punto de medición ($x = x_i$); si la diferencia entre estos datos no son menores o iguales a $1 \cdot 10^{-3}$, se reinicia el procedimiento fijando otro tiempo de la misma manera que se mostró en la figura 5. Culminadas las operaciones anteriormente descritas, se obtiene el primer tiempo de corte; el cual, para efectos prácticos, es utilizado en la estimación del segundo tiempo de corte ya que (como se mostrará después), mediante el análisis en la determinación de estos valores con el uso de la alternativa 1, se verá que la diferencia entre el tiempo medio y el primer tiempo de corte es aproximadamente igual a la diferencia entre el segundo tiempo de corte y el tiempo medio.

Como se pudo apreciar en este capítulo, existe una gran diferencia entre una y otra alternativa; pues considerar un coeficiente de dispersión axial variable con la concentración, dificulta la realización de los procesos tanto matemáticos como numéricos, debido a la gran cantidad de operaciones algebraicas y el elevado número de iteraciones que deben ser realizadas para calcular el perfil de concentraciones en solamente un determinado tiempo.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se comparan los datos experimentales dados en un caso de estudio reportado en la literatura, con los resultados obtenidos de la simulación numérica realizada para cada una de las dos alternativas de solución propuestas. Seguidamente, se analizará la influencia que parámetros como la velocidad de flujo, el diámetro y la longitud de la tubería, ejercen sobre el volumen de contaminación.

3.1 CASO DE ESTUDIO

Con propósitos de evaluar las simulaciones numéricas realizadas para cada una de las alternativas propuestas, se tomó como fuente de datos experimentales el siguiente caso de estudio [11]: El sistema es un poliducto operado por Petrobras, el cual está conformado por los fluidos gasolina y Diesel, siendo el primero el fluido desplazado (denominado fluido "A") y el segundo el fluido desplazante (denominado fluido "B"). Las condiciones de operación y propiedades de los fluidos implicados en este sistema se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de los fluidos y condiciones de operación del caso base.

Propiedad	Fluido "A"	Fluido "B"
Peso específico [N/m ³]	7 193,2	8 163,4
Viscosidad cinemática [m ² /s]	0,9*10 ⁻⁶	7,6*10 ⁻⁶
Condiciones de operación		
Diámetro de la tubería [m]	0,254	
Longitud de la tubería [m]	200 000	
Caudal [m ³ /s]	0,068	

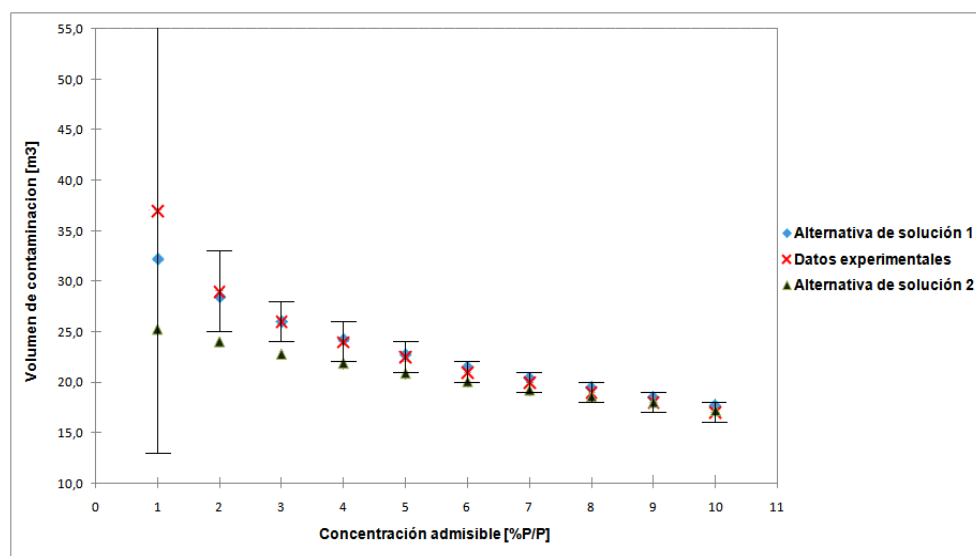
Fuente: Tomado de [3, 4, 11].

3.1.1 Análisis de las alternativas de solución. Con el objetivo de determinar el volumen de contaminación a diferentes concentraciones admisibles, se probaron las dos alternativas de solución con las diferentes expresiones para el coeficiente

de dispersión axial dadas en la tabla 1; encontrándose, que la expresión que mejor se ajusta a los datos experimentales para el caso de la alternativa 1 es la propuesta por [17] (véase Anexo C1), en tanto que para el caso de la alternativa 2, la expresión que genera una mejor convergencia es la propuesta por [13]; de acuerdo con lo anterior, los resultados obtenidos por las vías de solución propuestas se esquematizan en las figuras 7 y 8.

En la figura 7, se muestra el perfil del volumen de contaminación en función de la concentración admisible para los datos experimentales y los resultados obtenidos por las simulaciones numéricas, correspondientes a un punto de medición ubicado a una distancia de 135 900 [m], medidos a partir del inicio de la tubería para el caso de estudio anteriormente especificado. En esta figura, se observa que la alternativa 1 estima los volúmenes de mezclado con una discrepancia no mayor de 4,9% con respecto a los datos experimentales, en un rango de concentraciones admisibles que va del 2 a 10 [%p/p]. En cuanto a la alternativa 2, la diferencia entre los resultados y su respectivo valor experimental es menor del 8,6% para concentraciones admisibles mayores o iguales al 4% [p/p].

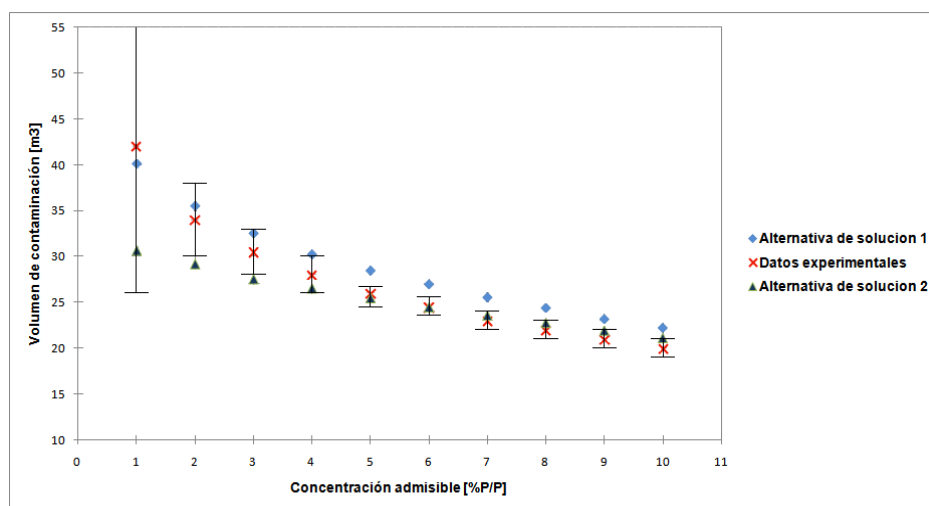
Figura 7. Comparación entre los resultados experimentales del caso de estudio y los arrojados por la simulación numérica a una distancia de 135 900 m.



Fuente: Autores del proyecto

Para una distancia de 199 900 [m], se aprecia en la figura 8 que los resultados de la simulación realizada para la alternativa 1 son buenos puesto que a pesar de que se alejan de su respectivo valor experimental, aún se encuentran en el intervalo de incertidumbre asociado a dichos datos para concentraciones admisibles de 1 a 4 [%p/p]; en cuanto al rango de concentraciones admisibles que va del 5 al 10 [%p/p], se puede ver que los datos obtenidos por esta misma vía, se encuentran fuera del intervalo de error mostrado por los datos experimentales; sin embargo, esta estimación puede considerarse aceptable debido a las pequeñas diferencias que existen entre los resultados y el límite superior de dicho intervalo. En el caso de la alternativa 2, los resultados concuerdan muy bien con los datos experimentales en la determinación del volumen de contaminación para el rango de concentraciones admisibles de 4 a 10% [p/p]; además, puede notarse también que para esta distancia, dicha alternativa presenta un comportamiento similar al mostrado en el caso donde la distancia del punto de medición es 135 900 [m].

Figura 8. Comparación entre los resultados experimentales del caso de estudio y los arrojados por la simulación numérica a una distancia de 199 900 m.



Fuente: Autores del proyecto.

3.2 TIEMPOS DE CORTE

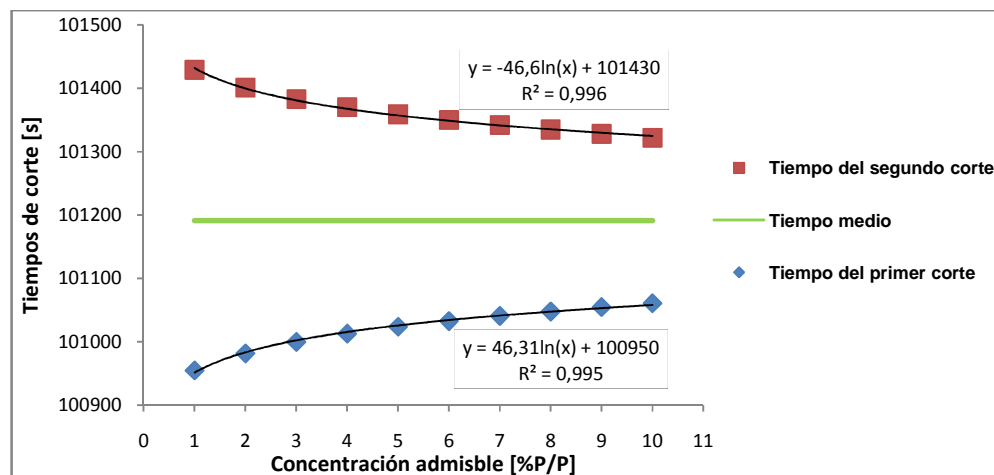
Con la necesidad de sentar las bases para hacer una posterior automatización del

proceso, se considera necesario determinar los tiempos para los cuales la concentración en el punto de medición corresponde con la concentración admisible tanto al inicio de la zona de contaminación (primer tiempo de corte) como al final de esta (segundo tiempo de corte). De acuerdo con su proximidad a los datos experimentales, la obtención de dichos tiempos se realizó mediante el uso de la alternativa 1 para el caso en el que el punto de medición está ubicado en $x = 135\,900$ [m] y la alternativa 1 junto con la 2 para una distancia de $199\,900$ [m] en un rango de concentraciones admisibles que va del 1 al 3% y del 4 al 10% respectivamente (véase las figuras 9 y 10).

En la figuras tanto 9 como 10 es posible apreciar que las curvas correspondientes a los tiempos para el primer y segundo corte, son casi simétricas respecto a un eje de simetría cuyo valor en la gráfica esta dado por el tiempo medio. Este resultado es de gran importancia para posteriores efectos prácticos, ya que se podría determinar de manera sencilla t_{AB} a partir de t_{BA} , mediante la siguiente expresión:

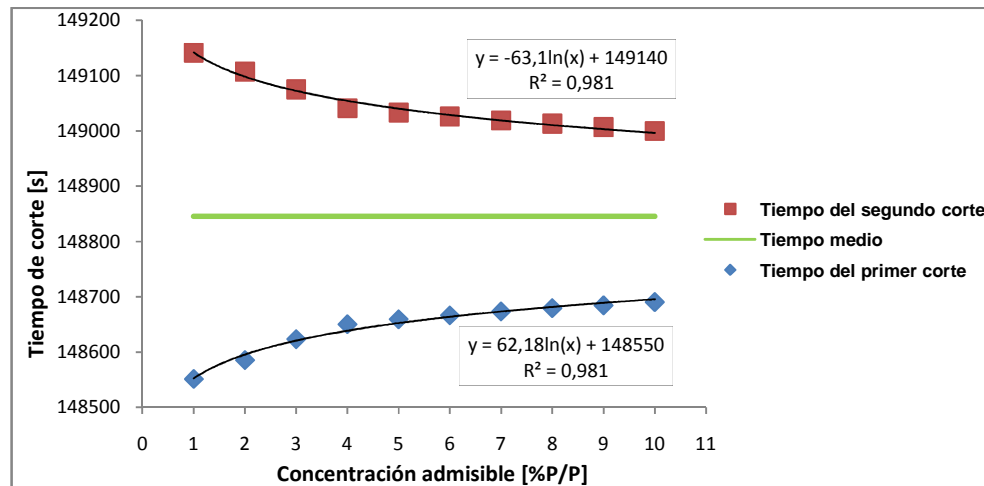
$$t_{AB} = t_m + (t_m - t_{BA}) \quad (31)$$

Figura 9. Resultados para los tiempos de corte a diferentes concentraciones admisibles en el punto de medición ubicado a una distancia de $135\,900$ [m].



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 10. Resultados para los tiempos de corte a diferentes concentraciones admisibles en el punto de medición ubicado a una distancia de 199 900 [m].



Fuente: Autores del proyecto.

Las figuras anteriormente obtenidas son de gran importancia práctica, ya que le permiten al operador determinar los tiempos de corte de acuerdo a la concentración admisible necesaria para que los fluidos en mención, al ser transportados mediante flujo batch, cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas; así pues, si es necesario que el fluido desplazado contenga un 2% de fluido desplazante, y este a su vez, pueda contener un 5 % del fluido desplazado, al final de la tubería (En este caso 199 900 [m]), se determinarán los tiempos de corte, utilizando las respectivas expresiones de ajuste, la expresión (31) o bien leyéndolos directamente de la gráfica mostrada en la figura 10 (En esta pequeña demostración, el primer tiempo de corte es aproximadamente 148 600 [s] y el segundo tiempo de corte es aproximadamente, 149 040 [s]).

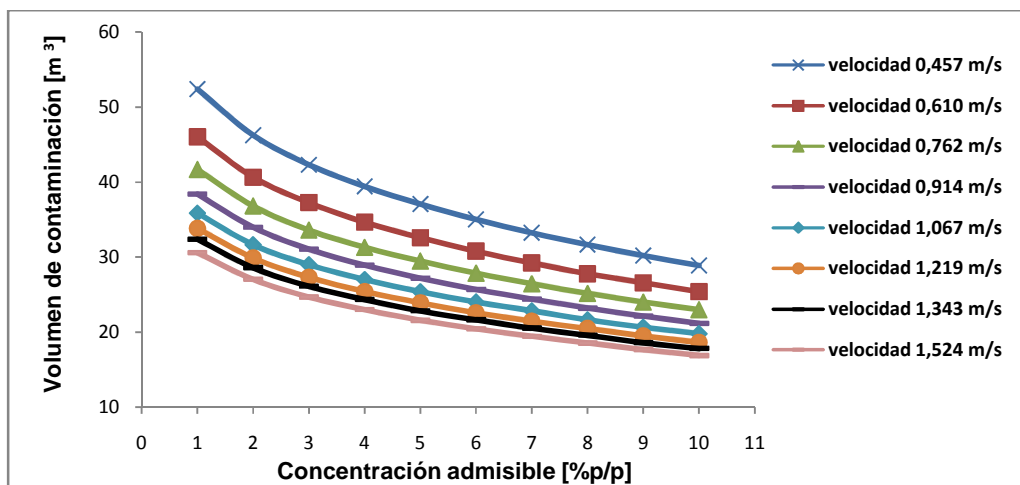
3.3 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA EN EL CRECIMIENTO DEL VOLUMEN DE CONTAMINACIÓN

Debido a la rapidez, practicidad y correspondencia con los datos experimentales, es deseable determinar con la alternativa 1 la manera en que aumenta o

disminuye el volumen de mezclado frente a la variación de parámetros como la velocidad de flujo, el diámetro y la longitud de la tubería.

3.3.1 Variación de la velocidad de flujo con diámetro constante. La figura 11 representa nuevamente el perfil del volumen de contaminación en función de la concentración admisible para diferentes velocidades de flujo manteniendo el diámetro constante e igual a 0,254 [m] (el tamaño de la tubería es escogido en base al caso de estudio). En esta figura se aprecia que los efectos debido al cambio en la velocidad del fluido, generan cambios apreciables en el volumen de contaminación dentro del rango de velocidad que va desde 0,457 a 0,914 m/s para una determinada concentración admisible; por otro lado, las curvas obtenidas a velocidades de flujo mayores que 1,067 m/s, además de exhibir una disminución en el volumen de mezcla, muestran también que el efecto sobre dicha magnitud se hace menos notorio. En general, el hecho de que un aumento en la velocidad de flujo disminuya el volumen de contaminación se debe principalmente a que el régimen de flujo se hace más turbulento, y con ello, la transferencia de masa de un fluido a otro se hace menos efectiva.

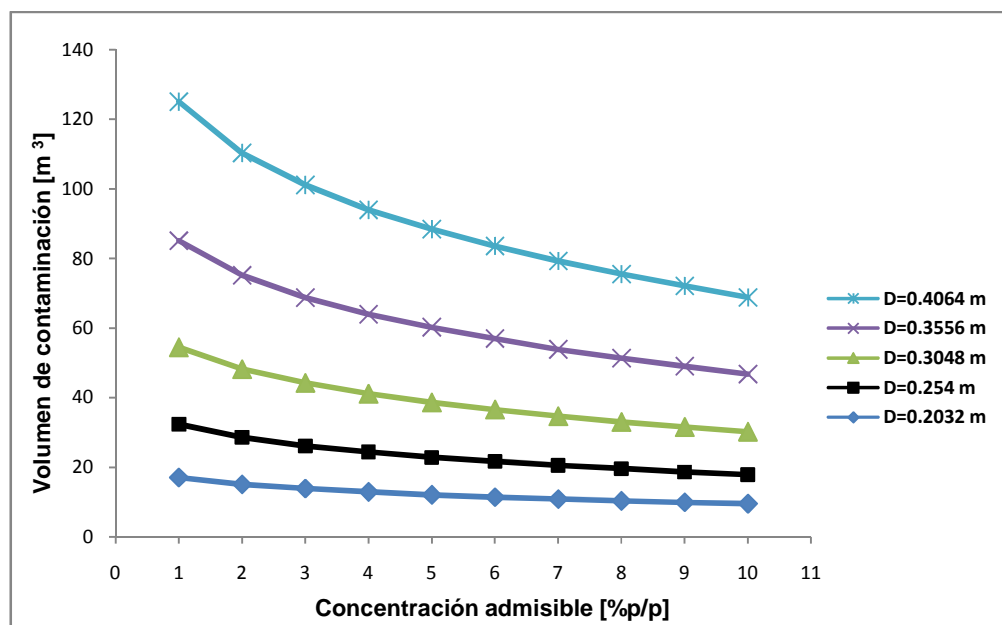
Figura 11. Efecto de la velocidad en el crecimiento del volumen de contaminación a una distancia del punto de medición corresponde a 135,9 [Km] y diámetro del poliducto de 0,254 [m] (La línea negra corresponde a los datos obtenidos en la simulación para el caso de estudio).



Fuente: Autores del proyecto

3.3.2 Variación del diámetro de la tubería con caudal constante. El perfil del volumen de contaminación en función de la concentración admisible y el diámetro de la tubería realizado para el caso de estudio está dado en la figura 12. En esta figura, se observa que al aumentar el diámetro de la tubería para una concentración admisible dada, se presentan cambios fuertes en el volumen de contaminación; esto se debe a que a medida que el diámetro crece, el área transversal disponible para la formación de los remolinos es mayor, favoreciéndose de esta manera el mezclado de los fluidos [9]. Por último, se aprecia que los cambios de diámetro de la tubería generan efectos en el volumen de mezclado más grandes, en comparación al efecto que sobre este ejerce el cambio en la velocidad de flujo analizado anteriormente. Lo anterior indica que el diámetro de la tubería es un parámetro de diseño que de acuerdo con el régimen de flujo puede afectar en gran medida el volumen de mezclado.

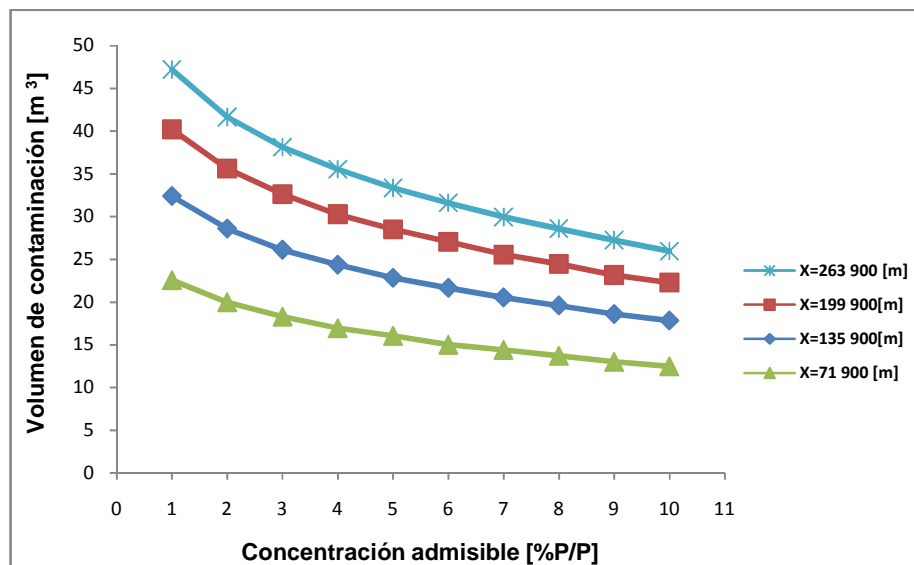
Figura 12. Efecto del diámetro de la tubería en el volumen de contaminación a una distancia del punto de medición de 135,9 [Km] y un caudal de 0,068 [m³/s] (La línea negra corresponde a los datos obtenidos en la simulación para el caso de estudio).



Fuente: Autores del proyecto

3.3.3 Longitud recorrida por los fluidos con velocidad y diámetro constantes. El perfil del volumen de contaminación en función de la concentración admisible y la longitud recorrida por los fluidos, realizado para el caso de estudio se esquematiza en la figura 13; en ella se observa que al aumentar la longitud recorrida, el volumen de contaminación se incrementa para una concentración admisible determinada, debido a que los fluidos permanecen un mayor tiempo en contacto; sin embargo, puede verse también que a medida que la longitud de la tubería recorrida por los fluidos se hace más grande, el cambio en el volumen de contaminación se hace más pequeño como consecuencia de la reducción de los gradientes de concentración en la zona de mezcla.

Figura 13. Efecto de la longitud recorrida por los fluidos en el volumen de contaminación para un poliducto con diámetro de 0,254 [m] y una velocidad de flujo de 1,343 [m/s] (Las distancias que se suponen como puntos de medición (x) se encuentran equiespaciadas).



Fuente: Autores del proyecto

De acuerdo con el análisis anteriormente realizado, el cambio en el diámetro de la tubería ejerce un mayor efecto sobre el volumen de mezclado en comparación con los demás parámetros. Esto puede traer consecuencias importantes al momento de realizar cualquier cambio en el sistema que conduzca hacia una reducción del volumen de mezclado en el proceso de transporte.

3.4 CUANTIFICACIÓN DEL EFECTO QUE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA EJERCEN SOBRE EL VOLUMEN DE MEZCLA

Como se observó anteriormente, el parámetro del sistema que mayor efecto ejerce sobre el volumen de contaminación es el diámetro de la tubería; por tanto, para cuantificar sus efectos y facilitar la toma de decisiones relacionadas con cambios en la infraestructura y/o condiciones de operación, se hizo necesario realizar un diseño experimental 2^k ⁽⁷⁾ seleccionando como niveles inferior y superior de la velocidad de flujo, los valores de 1,219 y 1,524 [m/s] respectivamente; así como también, el valor de 135 900 [m] para el nivel inferior y 199 900 [m] para el nivel superior de la longitud de la tubería (para saber como se calcularon los efectos de estos parámetros consúltese [6] y los datos mostrados en el Anexo D1). Una vez encontrada la inexistencia del efecto de las interacciones entre dichos parámetros (véase Anexo D2), se procedió a determinar el efecto que cada uno de estos ejercen sobre el volumen de mezclado a diferentes concentraciones admisibles (Véanse las tablas 3 a 5).

Tabla 3. Efecto de los parámetros involucrados en el sistema sobre el volumen de contaminación (Los niveles inferior y superior del diámetro de la tubería son 0,2032 [m] (8 in) y 0,254 [m] (10 in) respectivamente).

Concentración admisible	Efecto del diámetro del tubo	Efecto de la velocidad de flujo	Efecto de la longitud de la tubería
1	12,92	-2,98	6,46
2	11,38	-2,62	5,66
3	10,40	-2,40	5,25
4	9,71	-2,24	4,89
5	9,08	-2,08	4,56
6	8,67	-1,95	4,33
7	8,20	-1,89	4,13
8	7,85	-1,76	3,86
9	7,45	-1,67	3,76
10	7,14	-1,59	3,55

Fuente: Autores del proyecto.

⁷ “k” denota el número de variables independientes, cada una de ellas con dos niveles denotados como superior e inferior. El nivel inferior de una variable corresponde al valor más bajo y el nivel superior al valor más alto de la variable en cuestión en un intervalo de medición determinado.

Tabla 4. Efecto de los parámetros involucrados en el sistema sobre el volumen de contaminación (Los niveles inferior y superior del diámetro de la tubería son 0,254 [m] (10 in) y 0,3048 [m] (12 in) respectivamente).

Concentración admisible	Efecto del diámetro del tubo	Efecto de la velocidad de flujo	Efecto de la longitud de la tubería
1	15,68	-4,44	9,58
2	13,90	-3,88	8,47
3	12,72	-3,63	7,79
4	11,87	-3,36	7,25
5	11,14	-3,08	6,75
6	10,52	-2,88	6,40
7	10,03	-2,77	6,11
8	9,45	-2,62	5,81
9	9,03	-2,54	5,47
10	8,72	-2,43	5,27

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 5. Efecto de los parámetros involucrados en el sistema sobre el volumen de contaminación (Los niveles inferior y superior del diámetro de la tubería son 0,3048 [m] (12 in) y 0,3556 [m] (14 in) respectivamente).

Concentración admisible	Efecto del diámetro del tubo	Efecto de la velocidad de flujo	Efecto de la longitud de la tubería
1	18,55	-6,11	13,27
2	16,38	-5,26	11,80
3	14,97	-4,99	10,79
4	13,89	-4,59	10,07
5	13,13	-4,35	9,42
6	12,38	-4,06	8,85
7	11,64	-3,81	8,44
8	11,27	-3,68	8,13
9	10,76	-3,48	7,63
10	10,20	-3,32	7,33

Fuente: Autores del proyecto

Los valores dados en las anteriores tablas corresponden a la magnitud del cambio en el volumen de contaminación a medida que cada uno de los parámetros pasa del nivel inferior al nivel superior; así por ejemplo en la tabla 3, para una concentración admisible del 1% [p/p], se puede apreciar que cuando el diámetro de la tubería cambia de 0,2032 [m] (8 in) a 0,254 [m] (10 in), el volumen de contaminación aumenta en 12,92 m³; mientras que para la velocidad de flujo se aprecia que en un cambio de 1,219 a 1,524 [m/s], el volumen de contaminación disminuye en 2,98 m³.

4. CONCLUSIONES

- ✓ El empleo de la expresión dada por Sjenitzer para determinar un coeficiente de dispersión axial constante en la solución del modelo matemático propuesto, constituye una herramienta ágil y poderosa en la determinación del volumen de contaminación en función de la concentración admisible, puesto que los datos arrojados por la simulación numérica se mantienen dentro del rango de incertidumbre asociado a la medición de los datos experimentales para una distancia de 135 900 [m] y presentan una diferencia de solo un 4% con respecto al límite superior de dicho intervalo a una distancia de 199 900 [m].
- ✓ La consideración basada en el uso de un coeficiente de dispersión axial variable con la concentración, da origen a una ecuación integral en la que mediante la incorporación de la expresión propuesta por Krantz y Wasan, se encuentra que para distancias de 135 900 y 199 900 [m], los resultados arrojados por la simulación numérica se mantienen dentro del intervalo de incertidumbre asociado a la medición de los datos experimentales para concentraciones admisibles mayores o iguales al 4% [p/p].
- ✓ Mediante la resolución del modelo matemático propuesto, se ha obtenido una herramienta en la que a través de las expresiones algebraicas resultantes para la estimación de los tiempos de corte correspondientes a una determinada concentración admisible, es posible sentar las bases necesarias para realizar una posterior automatización del proceso de separación y respectivo almacenamiento de los fluidos al final de la línea.
- ✓ En el diseño factorial realizado se encontró que no existe una interdependencia entre el diámetro de la tubería, la longitud de la línea y la velocidad media de flujo. De la misma, se determinó que dentro de las posibles modificaciones que cada uno de estos parámetros pueda presentar, la que mayor efecto ejerce sobre el volumen de contaminación, es la ocasionada por el cambio en el diámetro de la tubería.

5. RECOMENDACIONES

- ✓ Determinar la velocidad media en el punto medio de la mezcla en función del tiempo y la variación del coeficiente de dispersión axial con la temperatura junto con la inclinación del tubo.
- ✓ Crear una interfaz gráfica entre el operador y el programa de forma tal que tanto el proceso en el ingreso de los datos como el de adquisición de los mismos sea más amigable y comprensible.
- ✓ Utilizar la alternativa de solución 1 para distancias en el punto de medición cercanas a 135 900 [m] y la alternativa 1 junto con la 2 para concentraciones admisibles del 1 al 3 % y del 4 al 10 % respectivamente para distancias en el punto de medición cercanos a 199 900 [m].
- ✓ Transportar hidrocarburos en poliductos con diámetros entre 0,203 y 0,254 [m] y a una velocidad media de flujo igual a 1,8 [m/s], con el fin de alcanzar la máxima reducción posible en el volumen de mezcla sin alterar el desempeño de los sistemas de bombeo.
- ✓ Las expresiones resultantes de la resolución del modelo matemático propuesto, concernientes a la estimación de los tiempos de corte para los cuales se debe separar el volumen de contaminación de la gasolina y de el diesel a una concentración admisible dada, pueden ser utilizadas de manera conjunta con los sistemas de control que actualmente está desarrollando el ICP (Sistema NIR) logrando así que el proceso de separación de los fluidos al final de la línea se realice de forma eficiente.
- ✓ Utilizar el modelo matemático propuesto junto con sus alternativas de solución, en el transporte de crudos pesados; siendo para esto necesario, realizar las respectivas mediciones experimentales de manera similar al caso de estudio planteado en la literatura.

BIBLIOGRAFIA

1. **ATSUSHI, HARA., HIDEO, HAYASHI., AND MASATO TSUCHIYA.,** "Mixing in serial flow in a products pipeline", Nippon Kokan Technical Report-overseas, December 1975. 51-55.
2. **AUNICKY, Z.,** " The longitudinal mixing of liquids flowing successively in pipelines," The Canadian journal of chemical engineering, Vol. 48. 12-16. 1970.
3. **BAPTISTA Renan, BASTOS DE FREITAS RACHID Felipe, CARNEIRO DE ARUJO Jose Henrique,** (2000b) Mixing Volume Evaluation under Pumping Shut-down Conditions. <http://www.psig.org/papers/2000/0111.pdf>
4. **BAPTISTA Renan, M., FREITAS RACHID Felipe,** "Estimating mixing volumes between batches in multiproduct pipelines" 2000 International pipeline conference-Volume 2, ASME 2000. 1665-1170.
5. **BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E.N.,** Fenómenos de transporte, Primera edición, editorial Reverté S.A. Barcelona, 1992. P.(5-1)-(5-14).
6. **BOX, G. E., HUNTER. W. G., HUNTER. J. S.,** Estadística para investigadores, editorial Reverté S.A. Barcelona, 1989. P. 317-329.
7. **D. E. Hull and J. W. Kent,** "Radioactive tracers to mark interfaces and measure intermixing in pipelines", Industry and engineering chemistry. 1952, Vol44, pp. 2745-2750.
8. **DAILY J. Y HARLEMAN D.** Dinámica de fluidos con aplicaciones a la ingeniería. Primera edición, Editorial Tillas, México, 1975. Págs. 69-71, 194-199, 299-324.
9. **DEMOYA, A. C., CRUZ, H.Q., HERNÁNDEZ P.N.,** "Modelamiento de la propagación de los frentes de contaminación generados por el transporte de combustibles por poliductos". Dyna. julio 2007. Págs. 89-96.
10. **FINLAYSON BRUCE. A.,** Nonlinear analysis in chemical engineering, first edition, editorial McGraw-Hill, 1980 págs. 172-177.

11. **FREITAS RACHID Felipe, CARNEIRO DE ARAUJO J. H., BSPTISTA R. M., 2002** “Predicting Mixing Volumes in Serial Transport in Pipelines” Transactions of the ASME. Journal of fluids engineering. Volumen 124, págs 528-533.
12. **GAMBILL Wallace R.** “How to Estimate Mixture Viscosities”, Chemical Engineering, March 9, 1959. Págs. 151-152.
13. **KRANTZ, W. B., AND WASAN, D T.,** “Axial dispersion in turbulent flow of power-law fluids in straight tubes,” Industrial Chemical Fundamentals, 1974, Vol 13 No 1, P, 56-61.
14. **KREYSZIG, E.** Matemáticas Avanzadas para Ingeniería. Limusa Wiley S.A Mexico.2000.
15. **LEVENSPIEL, O.,** “How much mixing occurs between batches” Pipe line industry, May 1958. P.51-54.
16. **LEVENSPIEL. O,** “Longitudinal Mixing of Fluids Flowing in Circular Pipes”, Industrial and Engineering Chemistry, 1958, Vol. 50, No. 3, p 343-346.
17. **SJENITZER, F.** “How much do products mix in a pipeline”, The Pipeline Engineer, 1958. pp. D31-D34.
18. **TAYLOR G. I.,”** Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a pipe”, Proceedings of Royal Society, series A, 1954, Vol 219, Pag. 186-203.
19. **TAYLOR G. I.,”** The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe”, Proceedings of Royal Society, series A, 1954, Vol 223, Pag. 446-468.
20. **TICHACEK L.J., BERKELEW C. H., BARON Thomas,** “Axial Mixing in Pipes” A.I.Ch.E. Journal, Vol, 3, No 4, December 1957, Pag. 439-442.

ANEXOS

Anexo A. Desarrollo matemático de las alternativas de solución propuestas

Anexo A1. Obtención de la solución de la ecuación (2), con el coeficiente de dispersión axial constante:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + V_z \frac{\partial C_i}{\partial x} = K \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}$$

Asignando $i = B$,

Definiendo las siguientes variables adimensionales:

$$J = \frac{C_B}{C_{B0}} \quad ; \quad \varphi = \frac{x - V_z * t}{\sqrt{4 * K * t}}$$

Desarrollando las derivadas correspondientes se tiene:

$$\partial C_B = C_{B0} * \partial \tau \quad ;$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{1}{\sqrt{4 * K * t}} \Rightarrow \partial x = (\sqrt{4 * K * t}) * \partial \varphi \Rightarrow \partial x^2 = (4 * K * t) * \partial \varphi^2$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{-V_z * \sqrt{4 * K * t} - (x - V_z * t)(1/2)(4 * K * t)^{-1/2}(4K)}{4 * K * t}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{-V_z}{\sqrt{4 * K * t}} - \frac{\varphi * 2K}{(4 * K * t)} \Rightarrow \partial t = \frac{\partial \varphi}{\left[\frac{-V_z}{\sqrt{4 * K * t}} - \frac{\varphi * 2K}{(4 * K * t)} \right]}$$

Reemplazando las derivadas en la EDP se llega a:

$$C_{B0} \frac{\partial J}{\partial \varphi} \left[\frac{-V_z}{\sqrt{4 * K * t}} - \frac{\varphi * 2K}{(4 * K * t)} \right] + \frac{V_z * C_{B0}}{\sqrt{4 * K * t}} \frac{\partial J}{\partial \varphi} = \frac{C_{B0} * K}{(4 * K * t)} \frac{\partial^2 J}{\partial \varphi^2}$$

Realizando el respectivo desarrollo matemático se obtiene:

$$\frac{-V_z * C_{B0} * \partial J}{\sqrt{4 * K * t} \partial \varphi} - \frac{\varphi * 2K * C_{B0} \partial J}{4 * K * t \partial \varphi} + \frac{V_z * C_{B0} \partial J}{\sqrt{4 * K * t} \partial \varphi} = \frac{C_{B0} * K}{(4 * K * t)} \frac{\partial^2 J}{\partial \varphi^2}$$

$$- \frac{\varphi * 2K * C_{B0} \partial J}{4 * K * t \partial \varphi} = \frac{C_{B0} * K}{(4 * K * t)} \frac{\partial^2 J}{\partial \varphi^2}$$

$$-2 * \varphi * \frac{\partial J}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 J}{\partial \varphi^2}$$

Haciendo $\psi = \frac{\partial J}{\partial \varphi}$ y reemplazando en la anterior ecuación se obtiene una EDOL dada por la siguiente expresión:

$$2 * \varphi * \psi + \psi' = 0$$

Con las nuevas condiciones de frontera:

$$\varphi = 0 \quad J = 0,5$$

$$\varphi = \infty \quad J = 0$$

La resolución de la EDOL, se realiza mediante el método de separación de variables:

$$\frac{\psi'}{\psi} = -2 * \varphi$$

Integrando la anterior ecuación se obtiene:

$$\ln \psi = -\varphi^2 + C_1 \Rightarrow \psi = C_2 * e^{-\varphi^2}$$

Donde C_1 representa la constante de integración y C_2 una constante.

Como $\psi = \frac{\partial J}{\partial \varphi}$ se integra nuevamente generando la siguiente expresión:

$$J = \int_0^{\varphi} C_2 * e^{-\varphi^2} d\varphi + C_3 \quad (*)$$

Aplicando las respectivas condiciones límite para determinar las constantes de integración se obtiene:

$$\varphi = 0 \quad ; \quad C_3 = 0,5$$

$$\varphi = \infty \quad ; \quad C_2 = \frac{-0,5}{\int_0^{\infty} e^{-\varphi^2} d\varphi}$$

Siendo

$$\int_0^{\infty} e^{-\varphi^2} d\varphi = \int_0^{\varphi} e^{-\varphi^2} d\varphi + \int_{\varphi}^{\infty} e^{-\varphi^2} d\varphi$$

Donde $\int_0^{\varphi} e^{-\varphi^2} d\varphi$ representa la función error (erf) y $\int_{\varphi}^{\infty} e^{-\varphi^2} d\varphi$ la función de error complementaria (erfc). Reemplazando C_3 y C_2 en (*), se obtiene:

$$J = 0,5 * \left(1 - \frac{\int_0^\varphi e^{-\varphi^2} d\varphi}{\int_0^\infty e^{-\varphi^2} d\varphi} \right)$$

$$J = 0,5 * (1 - \text{erf}(\varphi))$$

Finalmente, expresando la anterior ecuación en función de las variables originales se llega a:

$$\frac{C_B}{C_{B0}} = 0,5 * \left(1 - \text{erf} \left(\frac{x - V_Z * t}{\sqrt{4 * K * t}} \right) \right)$$

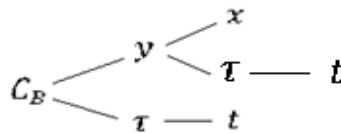
Anexo A2. Obtención de la solución de la ecuación (2), con el coeficiente de dispersión axial variable:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + V_Z \frac{\partial C_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(C_i) \frac{\partial C_i}{\partial x} \right] \quad (**)$$

Asignando $i = B$ y definiendo las siguientes variables adimensionales:

$$y = \frac{x}{D} - \tau ; \quad \tau = \frac{V_Z * t}{D}$$

Se construye el siguiente diagrama de precedencia con el fin de aplicar la regla de la cadena:



$$\frac{\partial C_B}{\partial x} = \frac{\partial C_B}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial C_B}{\partial y} * \frac{1}{D} ; \quad \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1}{D}$$

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = \frac{\partial C_B}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} + \frac{\partial C_B}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial C_B}{\partial y} * \left(-1 * \frac{V_Z}{D} \right) + \frac{\partial C_B}{\partial \tau} * \left(\frac{V_Z}{D} \right)$$

Reemplazando las anteriores derivadas en (**) se llega a:

$$\left(-\frac{V_Z}{D} \right) * \frac{\partial C_B}{\partial y} + \frac{\partial C_B}{\partial \tau} * \left(\frac{V_Z}{D} \right) + V_Z * \frac{\partial C_B}{\partial y} * \frac{1}{D} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial y} \left[K(C_i) \frac{\partial C_B}{\partial y} * \frac{1}{D} \right]$$

Realizando las respectivas simplificaciones se obtiene:

$$\frac{\partial C_B}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\kappa(C_i) \left(\frac{\partial C_B}{\partial y} \right) \right]$$

Siendo

$$\kappa(C_i) = \frac{K(C_i)}{D * v_z}$$

Anexo A3. Obtención de la EDO no lineal, con el coeficiente de dispersión variable:

Partiendo de:

$$\frac{\partial C_B}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\kappa(C_i) \left(\frac{\partial C_B}{\partial y} \right) \right]$$

Y definiendo las siguientes variables adimensionales:

$$J = \frac{C_B}{C_{B0}^*} \quad ; \quad \eta = \frac{y}{\sqrt{4 * \kappa(C_{B0}^*) * \tau}}$$

Se desarrollan las respectivas derivadas obteniéndose:

$$\partial C_{B0} = C_{B0}^* * \partial J$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{1}{\sqrt{4 * \kappa(C_{B0}^*) * \tau}} \quad ;$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \frac{-y * \left(\frac{1}{2}\right) * (4 * \kappa(C_{B0}^*) * \tau)^{-1/2} * (4 * \kappa(C_{B0}^*))}{4 * \kappa(C_{B0}^*) * \tau} = \frac{-2 * \kappa(C_{B0}^*) * \eta}{4 * \kappa(C_{B0}^*) * \tau}$$

Reemplazando las anteriores derivadas en la EDP no lineal, se obtiene:

$$C_{B0}^* \frac{\partial J}{\partial \eta} \left(\frac{-2 * \kappa(C_{B0}^*) * \eta}{4 * \kappa(C_{B0}^*) * \tau} \right) = \frac{1}{\sqrt{4 * \kappa(C_{B0}^*) * \tau}} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\kappa(C_i) \frac{C_{B0}^*}{\sqrt{4 * \kappa(C_{B0}^*) * \tau}} \frac{\partial J}{\partial \eta} \right]$$

Eliminando términos se llega a la ecuación (24):

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[K^*(J) \frac{\partial J}{\partial \eta} \right] + 2 * \eta \frac{\partial J}{\partial \eta} = 0$$

Siendo $K^*(J) = \frac{\kappa(C_i)}{\kappa(C_{B0}^*)}$

Con las condiciones de frontera:

$$J(\infty) = 0 \quad ; \quad J(0) = 1$$

Anexo A4. Desarrollo matemático para obtener la solución de la ecuación (24):

La ecuación obtenida en (A3) puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[K^* \frac{\partial J}{\partial \eta} \right] = - \frac{2\eta(K^*)}{K^*} \frac{\partial J}{\partial \eta}$$

Denotando $y = K^* \frac{\partial J}{\partial \eta}$ se llega a:

$$\frac{\partial y}{\partial \eta} = - \frac{2\eta * y}{K^*(J(\eta))}$$

Integrando se obtiene:

$$y = A * \exp \left[- \int_0^\eta \frac{2z}{K^*(J(z))} dz \right]$$

Igualando $y = K^* \frac{\partial J}{\partial \eta}$ con la anterior ecuación, se tiene:

$$K^* \frac{\partial J}{\partial \eta} = A * \exp \left[- \int_0^\eta \frac{2z}{K^*(J(z))} dz \right]$$

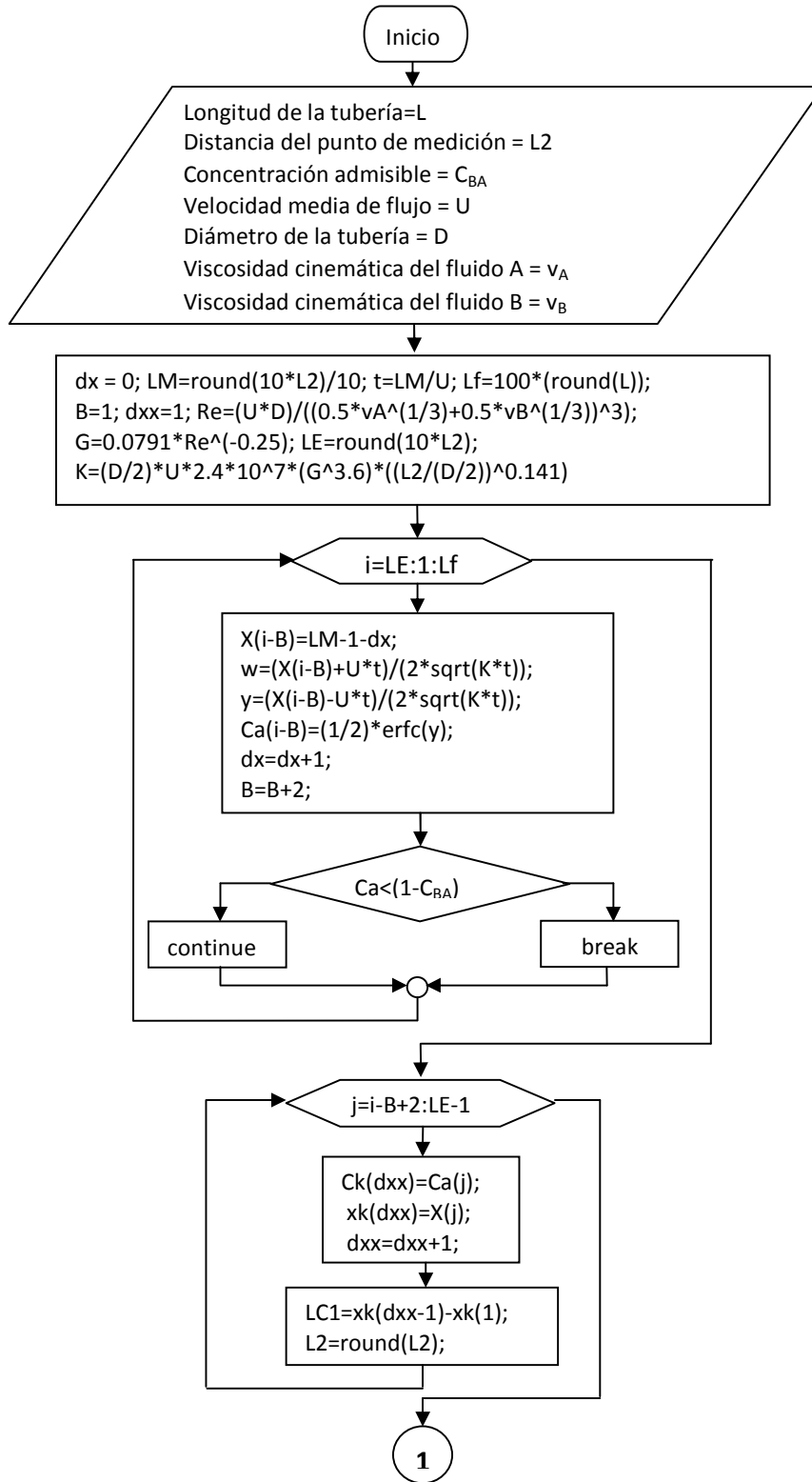
Integrando una vez más para obtener:

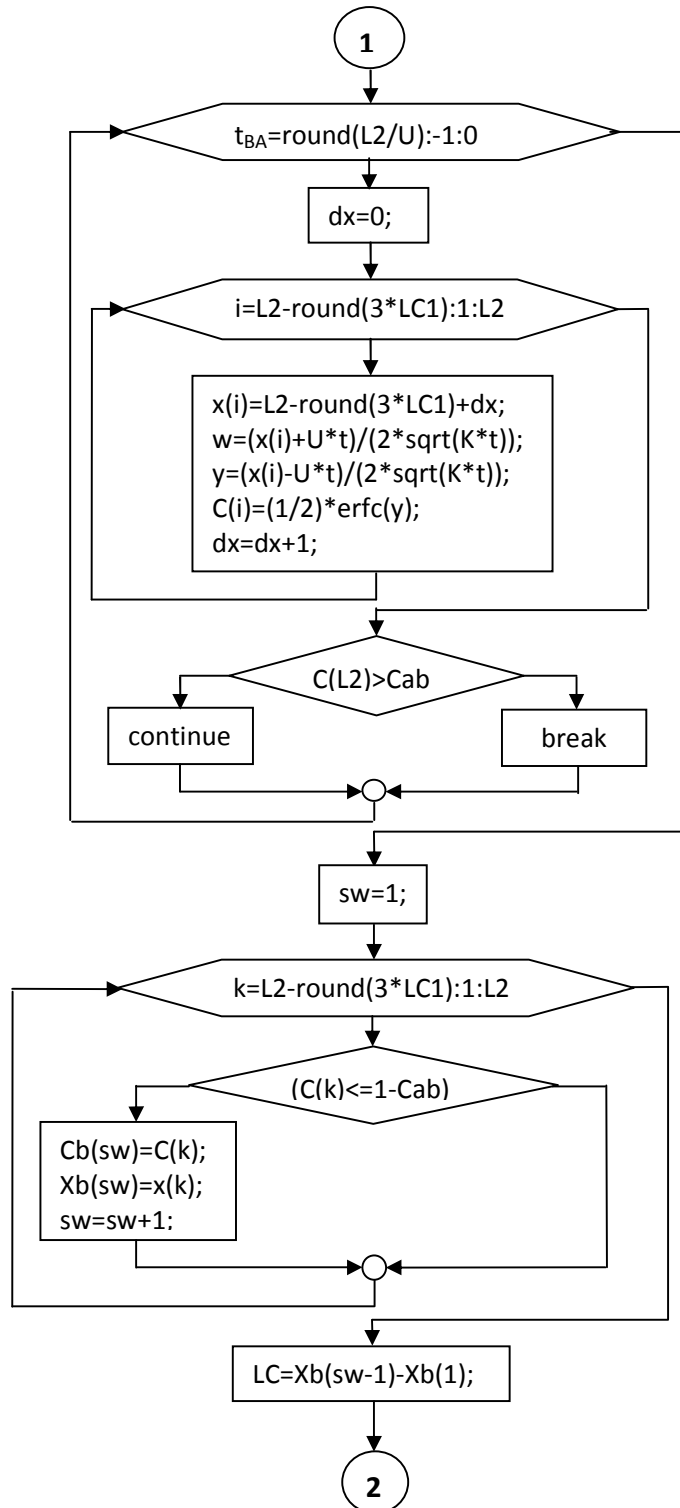
$$J(\eta) = B + A \int_0^\eta \left[\frac{1}{K^*(J(\xi))} \exp \left(- \int_0^\xi \frac{2z}{K^*(J(z))} dz \right) \right] d\xi = B + Af(\eta)$$

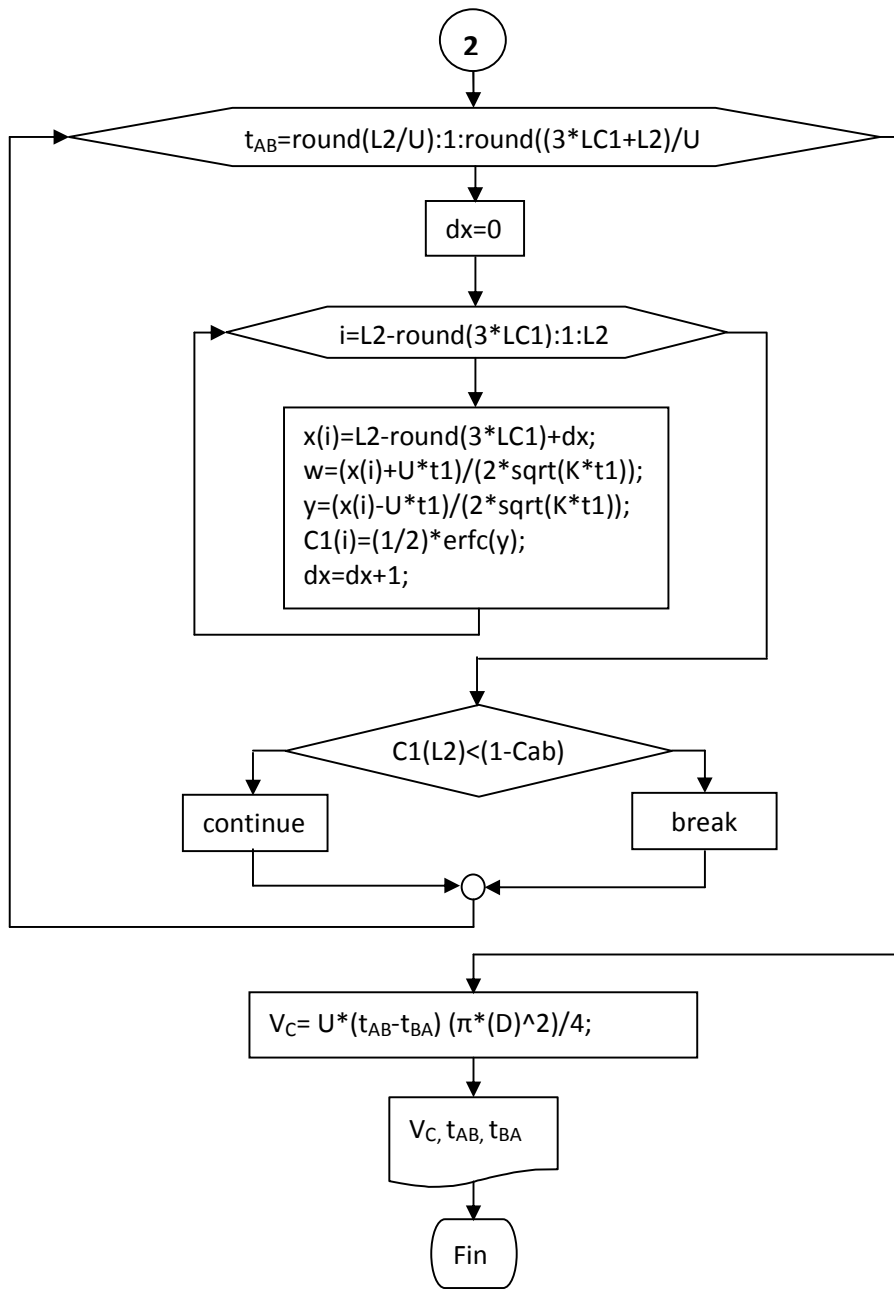
Donde B, A son constantes de integración.

Anexo B. Algoritmos

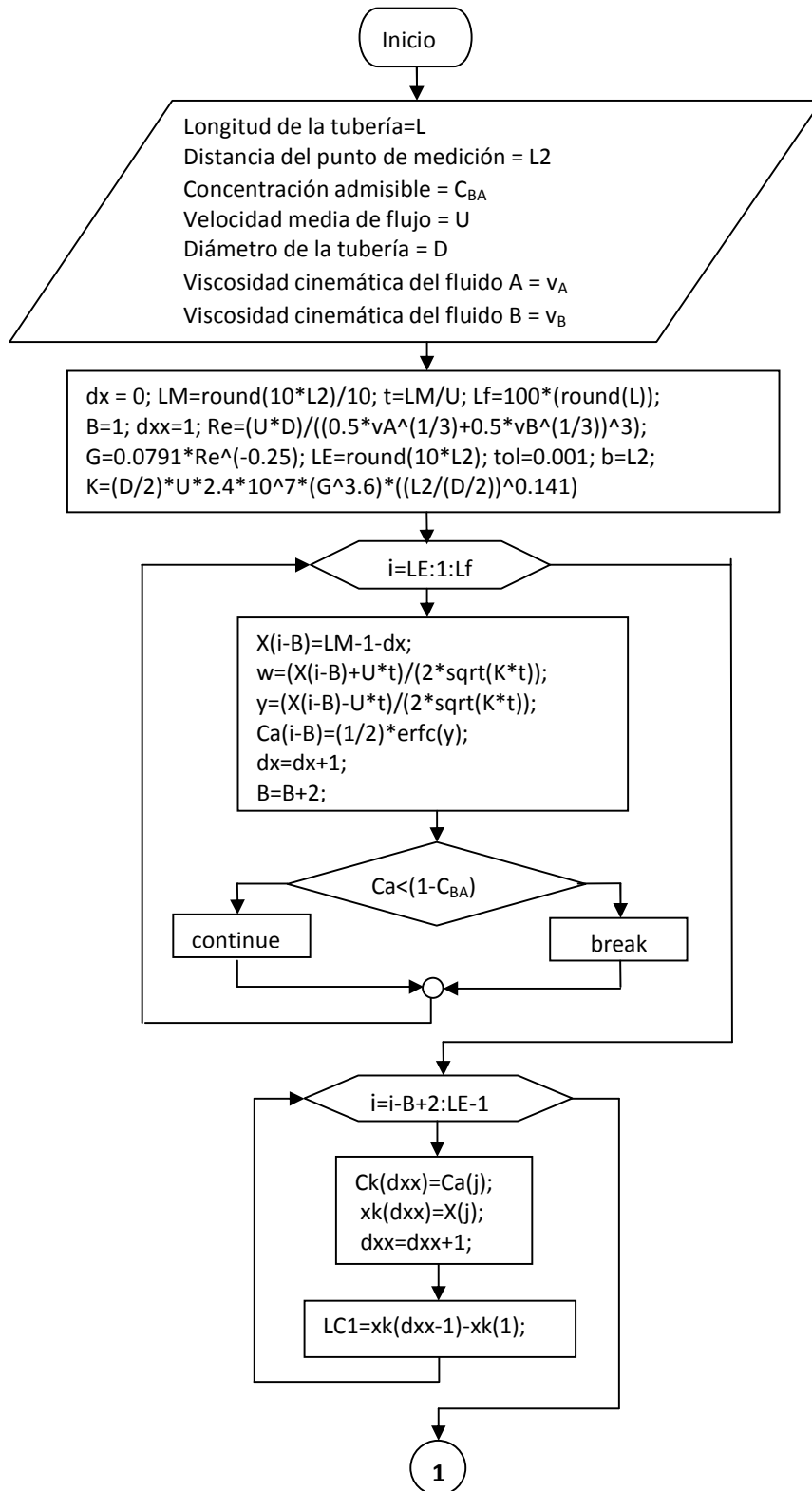
Anexo B1. Algoritmo de solución para la alternativa 1:

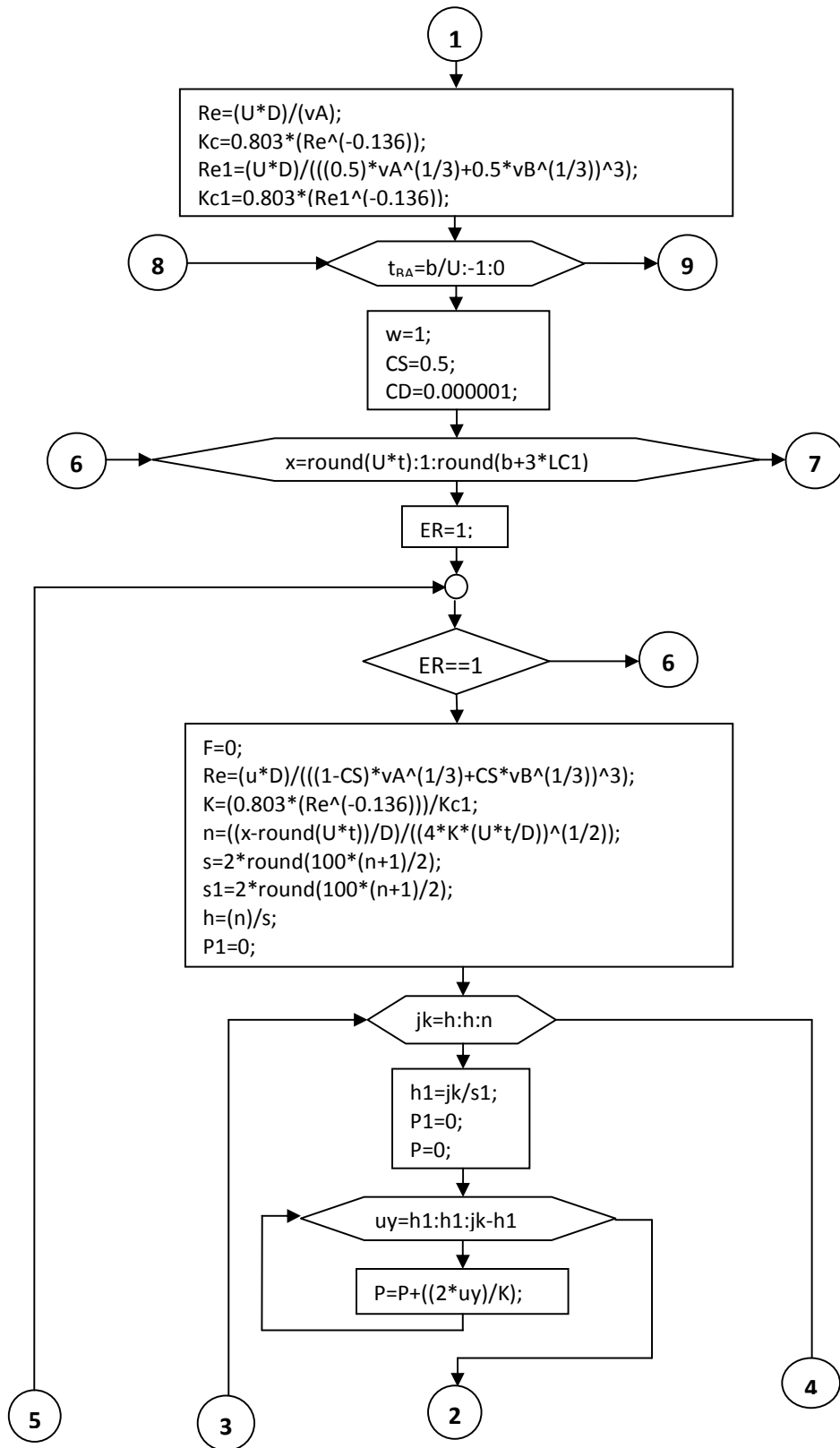


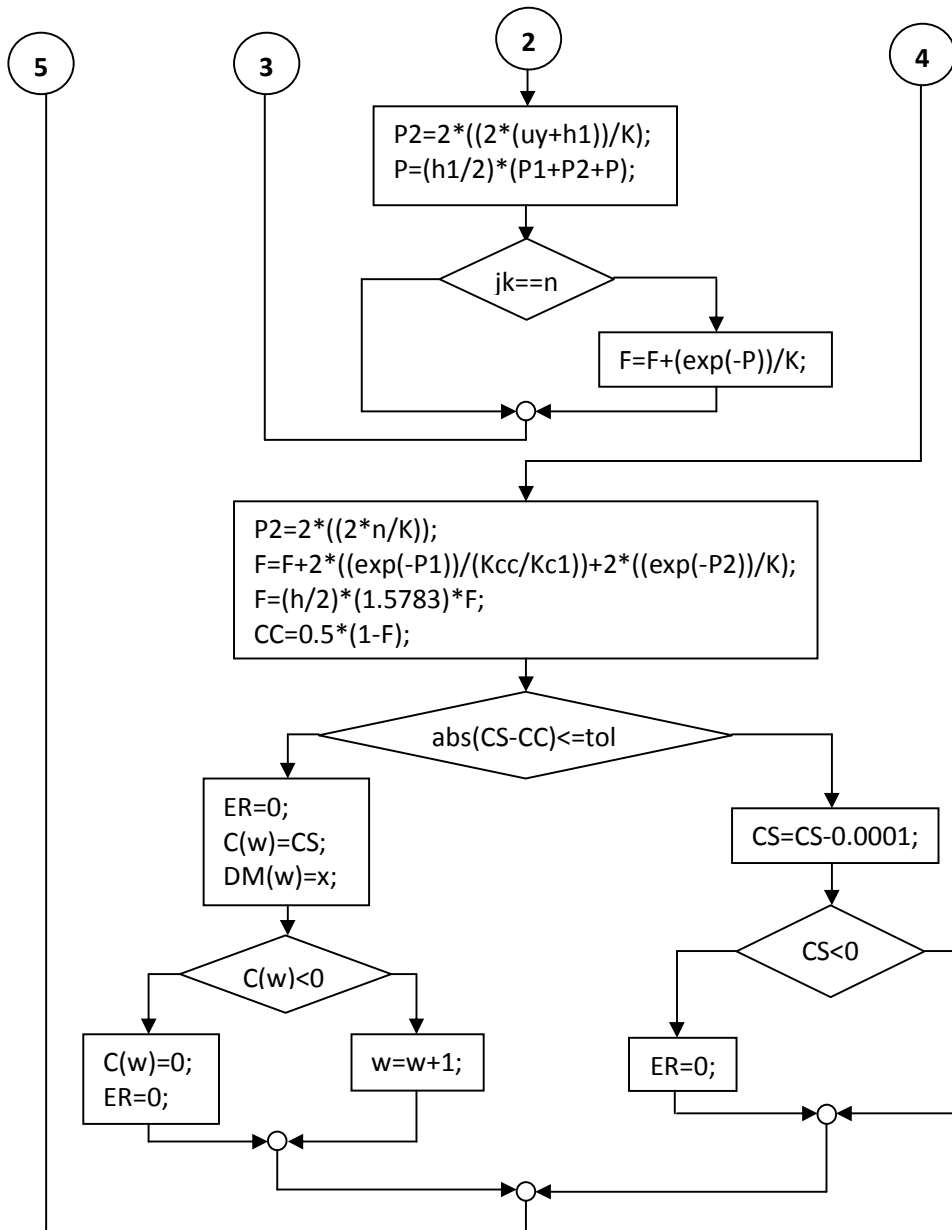


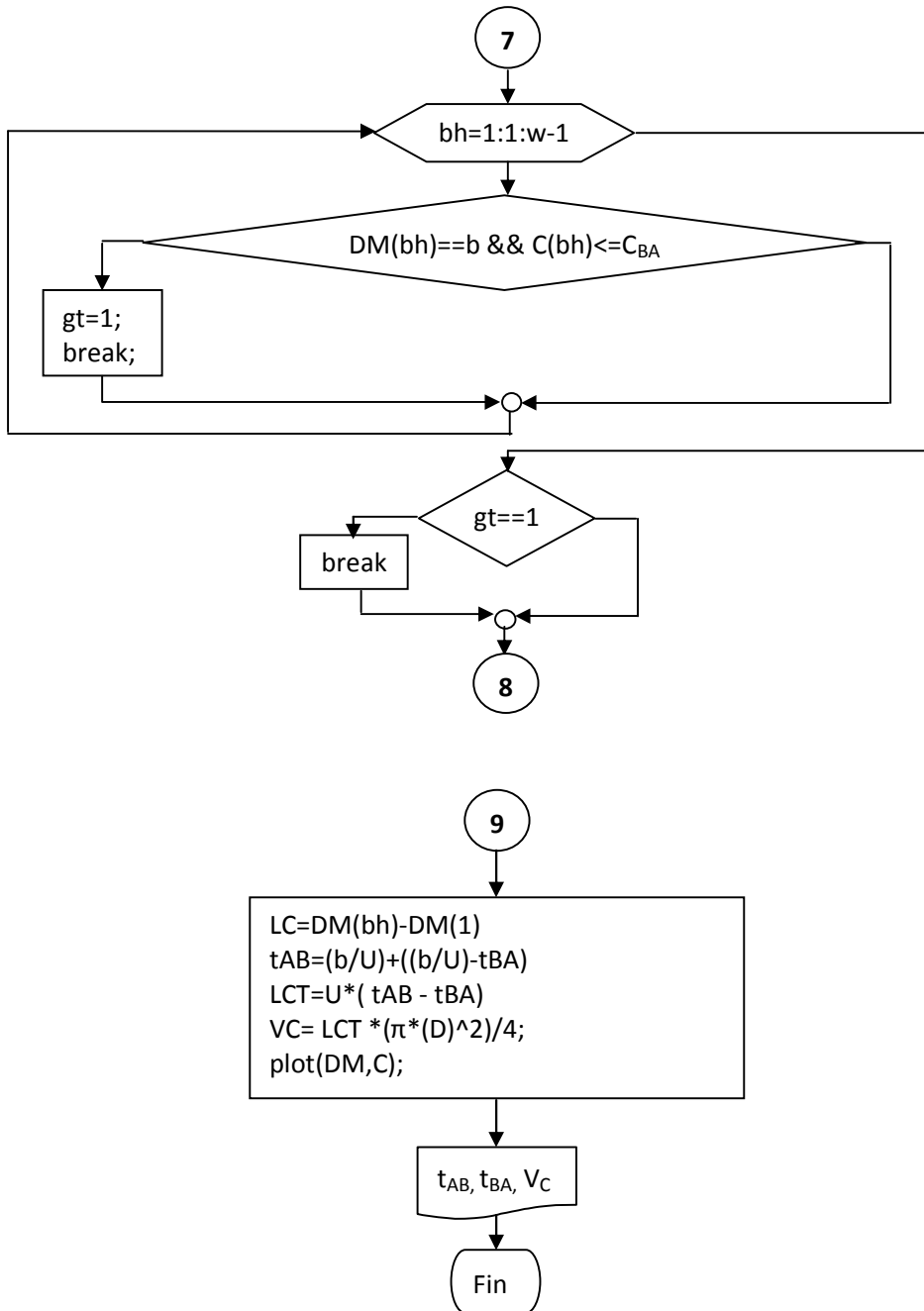


Anexo B2. Algoritmo de solución para la alternativa 2:







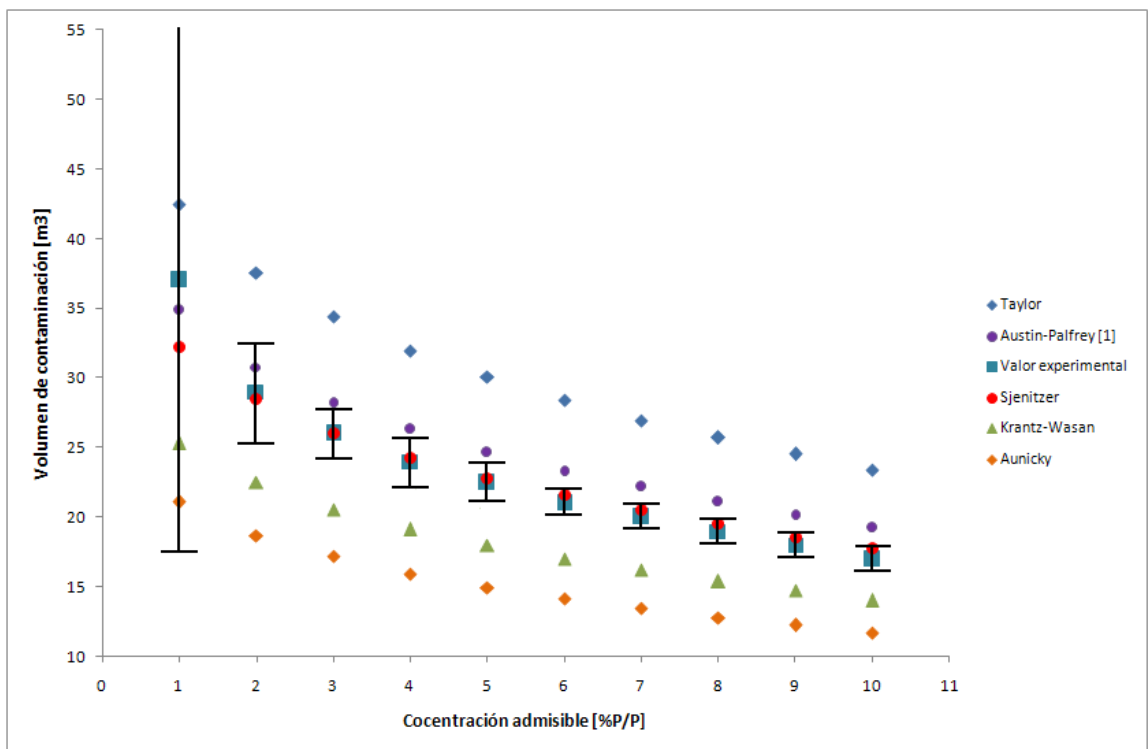


ANEXO C. Comparación entre los datos experimentales del caso de estudio y los resultados obtenidos por el modelo con las expresiones para la determinación del coeficiente de dispersión axial dados en la tabla 1.

Anexo C1. Perfiles del volumen de mezclado en función de la concentración admisible para las diferentes expresiones del coeficiente de dispersión axial dadas en la tabla 1, para una distancia del punto de medición igual 135 900 [m].

A continuación, en la figura 14 se muestran las diferentes curvas obtenidas para determinar el volumen de contaminación utilizando las expresiones propuestas por los autores referenciados en la tabla 1.

Figura 14. Comparación de los resultados obtenidos mediante la incorporación a la solución del modelo de las expresiones para la determinación del coeficiente de dispersión axial usando la alternativa 1.



Fuente: Autores del proyecto

Para el caso en donde el punto de medición está ubicado a una distancia de 199 900 [m] las diferencias de los resultados entre uno y otro modelo se mantienen.

Anexo D. Datos de un diseño factorial 2^3 : efecto de las variables (velocidad de flujo, diámetro y longitud de la tubería) sobre el volumen de mezclado.

ANEXO D1. Efecto de los parámetros involucrados en el sistema sobre el volumen de mezclado, para diámetros de tubería 0,2032; 0,254; 0,3048; 0,3556 [m].

Tabla 6. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 10% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].

Concentración 10% [p/p]		Diámetro in		velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=8 in = 0,2032 [m]			1,219	135 900	11,9754	7,136825
2	D=10 in= 0,254[m]			1,219	135 900	18,6447	
3	D=8 in = 0,2032 [m]			1,524	135 900	10,8804	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=10 in= 0,254[m]			1,524	135 900	16,8969	
5	D=8 in = 0,2032 [m]			1,219	199 900	14,9074	-1,588825
6	D=10 in= 0,254[m]			1,219	199 900	23,147	
7	D=8 in = 0,2032 [m]			1,524	199 900	13,46	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=10 in= 0,254[m]			1,524	199 900	21,0819	

Tabla 7. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 9% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].

Concentración 9% [p/p]		Diámetro in		velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=8 in = 0,2032 [m]			1,219	135 900	12,5309	7,44965
2	D=10 in= 0,254[m]			1,219	135 900	19,5131	
3	D=8 in = 0,2032 [m]			1,524	135 900	11,3824	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=10 in= 0,254[m]			1,524	135 900	17,6813	
5	D=8 in = 0,2032 [m]			1,219	199 900	15,617	-1,6714
6	D=10 in= 0,254[m]			1,219	199 900	24,3066	
7	D=8 in = 0,2032 [m]			1,524	199 900	14,1952	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=10 in= 0,254[m]			1,524	199 900	22,0231	

Tabla 8. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 8% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].

Concentración 8% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	135 900	13,1798	7,8507
2	D=10 in= 0,254[m]	1,219	135 900	20,505	
3	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	135 900	11,886	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=10 in= 0,254[m]	1,524	135 900	18,5694	
5	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	199 900	16,3267	-1,7586
6	D=10 in= 0,254[m]	1,219	199 900	25,3648	
7	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	199 900	14,7652	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=10 in= 0,254[m]	1,524	199 900	23,1213	

Tabla 9. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 7% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].

Concentración 7% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	135 900	13,7962	8,1966
2	D=10 in= 0,254[m]	1,219	135 900	21,4685	
3	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	135 900	12,4884	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=10 in= 0,254[m]	1,524	135 900	19,46	
5	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	199 900	17,2229	-1,8918
6	D=10 in= 0,254[m]	1,219	199 900	26,7651	
7	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	199 900	15,5684	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=10 in= 0,254[m]	1,524	199 900	24,1687	

Tabla 10. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 6% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].

Concentración 6% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	135 900	14,5059	8,660025	
2	D=10 in= 0,254[m]	1,219	135 900	22,6		
3	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	135 900	13,1572	Efecto de la velocidad de flujo	
4	D=10 in= 0,254[m]	1,524	135 900	20,4544		
5	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	199 900	18,0543	-1,949175	
6	D=10 in= 0,254[m]	1,219	199 900	28,1148		
7	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	199 900	16,3392	Efecto de la longitud de la tubería	
8	D=10 in= 0,254[m]	1,524	199 900	25,5275		

Tabla 11. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 5% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].

Concentración 5% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	135 900	15,4021	9,0809	
2	D=10 in= 0,254[m]	1,219	135 900	23,9279		
3	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	135 900	13,9604	Efecto de la velocidad de flujo	
4	D=10 in= 0,254[m]	1,524	135 900	21,6056		
5	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	199 900	19,1512	-2,08385	
6	D=10 in= 0,254[m]	1,219	199 900	29,7052		
7	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	199 900	17,3432	Efecto de la longitud de la tubería	
8	D=10 in= 0,254[m]	1,524	199 900	26,9418		

Tabla 12. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 4% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].

Concentración 4% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	135 900	16,3267	9,70935
2	D=10 in= 0,254[m]	1,219	135 900	25,446	
3	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	135 900	14,8316	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=10 in= 0,254[m]	1,524	135 900	23,0175	
5	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	199 900	20,3699	-2,2405
6	D=10 in= 0,254[m]	1,219	199 900	31,7329	
7	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	199 900	18,4476	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=10 in= 0,254[m]	1,524	199 900	28,6168	

Tabla 13. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 3% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].

Concentración 3% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	135 900	17,6244	10,404025
2	D=10 in= 0,254[m]	1,219	135 900	27,3285	
3	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	135 900	15,936	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=10 in= 0,254[m]	1,524	135 900	24,6925	
5	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	199 900	21,8825	-2,404675
6	D=10 in= 0,254[m]	1,219	199 900	34,0457	
7	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	199 900	19,8208	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=10 in= 0,254[m]	1,524	199 900	30,8131	

Tabla 14. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 2% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].

Concentración 2% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	135 900	19,1979	11,383775	
2	D=10 in= 0,254[m]	1,219	135 900	29,9114		
3	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	135 900	17,442	Efecto de la velocidad de flujo	
4	D=10 in= 0,254[m]	1,524	135 900	27,0456		
5	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	199 900	23,9041	-2,618875	
6	D=10 in= 0,254[m]	1,219	199 900	37,1315		
7	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	199 900	21,5956	Efecto de la longitud de la tubería	
8	D=10 in= 0,254[m]	1,524	199 900	33,5862		

Tabla 15. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 1% [p/p]. D=8 in = 0,2032 [m], D=10 in= 0,254[m].

Concentración 1% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	135 900	21,7284	12,920225	
2	D=10 in= 0,254[m]	1,219	135 900	33,8666		
3	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	135 900	19,6864	Efecto de la velocidad de flujo	
4	D=10 in= 0,254[m]	1,524	135 900	30,6031		
5	D=8 in = 0,2032 [m]	1,219	199 900	27,0834	-2,982125	
6	D=10 in= 0,254[m]	1,219	199 900	42,0993		
7	D=8 in = 0,2032 [m]	1,524	199 900	24,4748	Efecto de la longitud de la tubería	
8	D=10 in= 0,254[m]	1,524	199 900	38,0849		

Tabla 16. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 10% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].

Concentración 10% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	135 900	18,6447	8,72455	
2	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	26,877		
3	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	135 900	16,8969	Efecto de la velocidad de flujo	
4	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	24,255		
5	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	199 900	23,147	-2,4269	
6	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	33,4047		
7	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	199 900	21,0819	Efecto de la longitud de la tubería	
8	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	30,132		

Tabla 17. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 9% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].

Concentración 9% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	135 900	19,5131	9,031025	
2	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	28,0577		
3	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	135 900	17,6813	Efecto de la velocidad de flujo	
4	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	25,3845		
5	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	199 900	24,3066	-2,541425	
6	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	34,7916		
7	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	199 900	22,0231	Efecto de la longitud de la tubería	
8	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	31,4144		

Tabla 18. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 8% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].

Concentración 8% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	135 900	20,505	9,446475
2	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	29,2348	
3	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	135 900	18,5694	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	26,5176	
5	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	199 900	25,3648	-2,624675
6	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	36,5982	
7	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	199 900	23,1213	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	32,9958	

Tabla 19. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 7% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].

Concentración 7% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	135 900	21,4685	10,030775
2	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	30,9046	
3	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	135 900	19,46	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	27,873	
5	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	199 900	26,7651	-2,773125
6	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	38,3319	
7	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	199 900	24,1687	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	34,8759	

Tabla 20. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 6% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].

Concentración 6% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	135 900	22,6	10,517
2	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	32,5013	
3	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	135 900	20,4544	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	29,3778	
5	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	199 900	28,1148	-2,8804
6	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	40,2754	Efecto de la longitud de la tubería
7	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	199 900	25,5275	
8	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	36,6102	6,3986

Tabla 21. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 5% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].

Concentración 5% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	135 900	23,9279	11,13835
2	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	34,235	
3	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	135 900	21,6056	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	31,185	
5	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	199 900	29,7052	-3,07725
6	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	42,7436	Efecto de la longitud de la tubería
7	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	199 900	26,9418	
8	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	38,5703	6,75185

Tabla 22. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 4% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].

Concentración 4% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	135 900	25,446	11,86775
2	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	36,5982	
3	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	135 900	23,0175	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	32,9958	
5	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	199 900	31,7329	-3,35695
6	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	45,4855	
7	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	199 900	28,6168	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	41,2047	

Tabla 23. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 3% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].

Concentración 3% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	135 900	27,3285	12,717475
2	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	39,3082	
3	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	135 900	24,6925	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	35,4077	
5	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	199 900	34,0457	-3,628275
6	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	48,8889	
7	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	199 900	30,8131	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	44,1449	

Tabla 24. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 2% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].

Concentración 2% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	135 900	29,9114	13,896675
2	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	42,8485	
3	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	135 900	27,0456	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	38,7198	
5	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	199 900	37,1315	-3,877925
6	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	53,3325	
7	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	199 900	33,5862	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	48,3606	

Tabla 25. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 1% [p/p]. D=10 in = 0,254 [m], D=12 in= 0,3048 [m].

Concentración 1% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	135 900	33,8666	15,682125
2	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	48,5422	
3	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	135 900	30,6031	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	43,8426	
5	D=10 in = 0,254 [m]	1,219	199 900	42,0993	-4,435575
6	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	60,3812	
7	D=10 in = 0,254 [m]	1,524	199 900	38,0849	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	54,6164	

Tabla 26. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 10% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].

Concentración 10% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	26,877	10,1965
2	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	135 900	36,2461	
3	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	24,255	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	135 900	33,0138	
5	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	33,4047	-3,32395
6	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	199 900	45,1818	
7	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	30,132	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	199 900	41,013	

Tabla 27. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 9% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].

Concentración 9% [p/p]					
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	28,0577	10,755025
2	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	135 900	37,904	
3	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	25,3845	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	135 900	34,5512	
5	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	34,7916	-3,475125
6	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	199 900	47,3552	
7	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	31,4144	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	199 900	42,8579	

Tabla 28. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 8% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].

Concentración 8% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	29,2348	11,2682	
2	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	135 900	39,8911		
3	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	26,5176	Efecto de la velocidad de flujo	
4	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	135 900	35,9893	-3,68495	
5	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	36,5982		
6	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	199 900	49,5286	Efecto de la longitud de la tubería	
7	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	32,9958		
8	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	199 900	45,0102	8,125	

Tabla 29. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 7% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].

Concentración 7% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	30,9046	11,644775	
2	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	135 900	41,7789		
3	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	27,873	Efecto de la velocidad de flujo	
4	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	135 900	37,8341	-3,814375	
5	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	38,3319		
6	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	199 900	51,8883	Efecto de la longitud de la tubería	
7	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	34,8759		
8	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	199 900	47,0632	8,442175	

Tabla 30. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 6% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].

Concentración 6% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	32,5013	12,3791	
2	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	135 900	43,9523		
3	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	29,3778	Efecto de la velocidad de flujo -4,06235	
4	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	135 900	39,9865		
5	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	40,2754	Efecto de la longitud de la tubería 8,8525	
6	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	199 900	54,9186		
7	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	36,6102		
8	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	199 900	49,4237		

Tabla 31. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 5% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].

Concentración 5% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	34,235	13,13425	
2	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	135 900	46,697		
3	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	31,185	Efecto de la velocidad de flujo -4,35455	
4	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	135 900	42,0395		
5	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	42,7436	Efecto de la longitud de la tubería 9,42295	
6	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	199 900	58,0359		
7	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	38,5703		
8	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	199 900	52,4985		

Tabla 32. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 4% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].

Concentración 4% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	36,5982	13,889275	
2	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	135 900	49,5286		
3	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	32,9958	Efecto de la velocidad de flujo	
4	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	135 900	44,8068		
5	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	45,4855	-4,587325	
6	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	199 900	61,6251		
7	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	41,2047	Efecto de la longitud de la tubería	
8	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	199 900	55,8808		

Tabla 33. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 3% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].

Concentración 3% [p/p]						
Experimento	Diámetro in	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería	
1	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	39,3082	14,974075	
2	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	135 900	53,2172		
3	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	35,4077	Efecto de la velocidad de flujo	
4	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	135 900	48,1891		
5	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	48,8889	-4,987025	
6	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	199 900	66,2576		
7	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	44,1449	Efecto de la longitud de la tubería	
8	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	199 900	59,9821		

Tabla 34. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 2% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].

Concentración 2% [p/p]					
Experimento	Diámetro	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	42,8485	16,375575
2	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	135 900	58,0359	
3	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	38,7198	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	135 900	52,8012	
5	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	53,3325	-5,255075
6	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	199 900	72,3058	
7	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	48,3606	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	199 900	65,6208	

Tabla 35. Efectos principales de los parámetros sobre el volumen de contaminación para una concentración admisible de 1% [p/p]. D=12 in = 0,3048 [m], D=14 in= 0,3556 [m].

Concentración 1% [p/p]					
Experimento	Diámetro	velocidad [m/s]	longitud [m]	volumen de contaminación [m ³]	Efecto del diámetro de la tubería
1	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	135 900	48,5422	18,55195
2	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	135 900	65,7856	
3	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	135 900	43,8426	Efecto de la velocidad de flujo
4	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	135 900	59,7739	
5	D=12 in=0,3048 [m]	1,219	199 900	60,3812	-6,11095
6	D=14 in=0,3556 [m]	1,219	199 900	81,9992	
7	D=12 in=0,3048 [m]	1,524	199 900	54,6164	Efecto de la longitud de la tubería
8	D=14 in=0,3556 [m]	1,524	199 900	74,0315	

Anexo D2. Efecto de las interacciones entre los parámetros (velocidad de flujo, diámetro y longitud de la tubería).

Tabla 36. Efecto de la interacción entre los parámetros del sistema para una concentración admisible de 10% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	7,45445
1,524	6,8192
Interacción diámetro X velocidad	0,31625
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	7,93075
135 900	6,3429
Interacción diámetro X longitud	0,793925
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-1,75625
135 900	-1,4214
Interacción velocidad X longitud	-0,167425

Tabla 37. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 9% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	7,8359
1,524	7,0634
Interacción diámetro X velocidad	0,38625
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	8,25875
135 900	6,64055
Interacción diámetro X longitud	0,8091
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-1,85265
135 900	-1,49015
Interacción velocidad X longitud	-0,18125

Tabla 38. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 8% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	8,18165
1,524	7,51975
Interacción diámetro X velocidad	0,33095
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	8,6971
135 900	7,0043
Interacción diámetro X longitud	0,8464
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-1,9025
135 900	-1,6147
Interacción velocidad X longitud	-0,1439

Tabla 39. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 7% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	8,60725
1,524	7,78595
Interacción diámetro X velocidad	0,41065
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	9,07125
135 900	7,32195
Interacción diámetro X longitud	0,87465
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-2,12545
135 900	-1,65815
Interacción velocidad X longitud	-0,23365

Tabla 40. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 6% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	9,0773
1,524	8,24275
Interacción diámetro X velocidad	0,417275
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	9,6244
135 900	7,69565
Interacción diámetro X longitud	0,964375
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-2,1512
135 900	-1,74715
Interacción velocidad X longitud	-0,202025

Tabla 41. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 5% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	9,5399
1,524	8,6219
Interacción diámetro X velocidad	0,459
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	10,0763
135 900	8,0855
Interacción diámetro X longitud	0,9954
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-2,2857
135 900	-1,882
Interacción velocidad X longitud	-0,20185

Tabla 42. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 4% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	10,24115
1,524	9,17755
Interacción diámetro X velocidad	0,5318
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	10,7661
135 900	8,6526
Interacción diámetro X longitud	1,05675
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-2,5192
135 900	-1,9618
Interacción velocidad X longitud	-0,2787

Tabla 43. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 3% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	10,93365
1,524	9,8744
Interacción diámetro X velocidad	0,529625
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	11,57775
135 900	9,2303
Interacción diámetro X longitud	1,173725
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-2,64715
135 900	-2,1622
Interacción velocidad X longitud	-0,242475

Tabla 44. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 2% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	11,97045
1,524	10,7971
Interacción diámetro X velocidad	0,586675
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	12,609
135 900	10,15855
Interacción diámetro X longitud	1,225225
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-2,9296
135 900	-2,31085
Interacción velocidad X longitud	-0,308025

Tabla 45. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 1% [p/p] (Diámetro de 8 a 10 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	13,57705
1,524	12,2634
Interacción diámetro X velocidad	0,656825
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	14,313
135 900	11,52745
Interacción diámetro X longitud	1,392775
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-3,3115
135 900	-2,65275
Interacción velocidad X longitud	-0,329375

Tabla 46. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 10% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	9,245
1,524	8,2041
Interacción diámetro X velocidad	0,52045
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	9,6539
135 900	7,7952
Interacción diámetro X longitud	0,92935
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-2,6689
135 900	-2,1849
Interacción velocidad X longitud	-0,242

Tabla 47. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 9% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	9,5148
1,524	8,54725
Interacción diámetro X velocidad	0,483775
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	9,93815
135 900	8,1239
Interacción diámetro X longitud	0,907215
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-2,83035
135 900	-2,2525
Interacción velocidad X longitud	-0,288925

Tabla 48. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 8% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	9,9816
1,524	8,91135
Interacción diámetro X velocidad	0,535125
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	10,55395
135 900	8,339
Interacción diámetro X longitud	1,107475
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-2,92295
135 900	-2,3264
Interacción velocidad X longitud	-0,298275

Tabla 49. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 7% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	10,50145
1,524	9,5601
Interacción diámetro X velocidad	0,470675
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	11,137
135 900	8,92455
Interacción diámetro X longitud	1,106225
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-3,0262
135 900	-2,52005
Interacción velocidad X longitud	-0,253075

Tabla 50. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 6% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	11,03095
1,524	10,00305
Interacción diámetro X velocidad	0,51395
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	11,62165
135 900	9,41235
Interacción diámetro X longitud	1,10465
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-3,12625
135 900	-2,63455
Interacción velocidad X longitud	-0,24585

Tabla 51. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 5% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	11,67275
1,524	10,60395
Interacción diámetro X velocidad	0,5344
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	12,33345
135 900	9,94325
Interacción diámetro X longitud	1,1951
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-3,46835
135 900	-2,68615
Interacción velocidad X longitud	-0,3911

Tabla 52. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 4% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	12,4524
1,524	11,2831
Interacción diámetro X velocidad	0,58465
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	13,17025
135 900	10,56525
Interacción diámetro X longitud	1,3025
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-3,69845
135 900	-3,01545
Interacción velocidad X longitud	-0,3415

Tabla 53. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 3% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	13,41145
1,524	12,0235
Interacción diámetro X velocidad	0,693975
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	14,0875
135 900	11,34745
Interacción diámetro X longitud	1,370025
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-3,9883
135 900	-3,26825
Interacción velocidad X longitud	-0,360025

Tabla 54. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 2% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	14,56905
1,524	13,2243
Interacción diámetro X velocidad	0,672375
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	15,4877
135 900	12,30565
Interacción diámetro X longitud	1,591025
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-4,2586
135 900	-3,49725
Interacción velocidad X longitud	-0,380675

Tabla 55. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 1% [p/p] (Diámetro de 10 a 12 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	16,47875
1,524	14,8855
Interacción diámetro X velocidad	0,796625
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	17,4067
135 900	13,95755
Interacción diámetro X longitud	1,724575
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-4,8896
135 900	-3,98155
Interacción velocidad X longitud	-0,454025

Tabla 56. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 10% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	10,5731
1,524	9,8199
Interacción diámetro X velocidad	0,3766
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	9,06395
135 900	11,32905
Interacción diámetro X longitud	-1,13255
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-2,92715
135 900	-3,72075
Interacción velocidad X longitud	0,3968

Tabla 57. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 9% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	11,20495
1,524	10,3051
Interacción diámetro X velocidad	0,449925
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	9,5065
135 900	12,00355
Interacción diámetro X longitud	-1,248525
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-3,013
135 900	-3,93725
Interacción velocidad X longitud	0,462125

Tabla 58. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 8% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	11,79335
1,524	10,74305
Interacción diámetro X velocidad	0,52515
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	10,064
135 900	12,4724
Interacción diámetro X longitud	-1,2042
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-3,3095
135 900	-4,0604
Interacción velocidad X longitud	0,37545

Tabla 59. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 7% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	12,21535
1,524	11,0742
Interacción diámetro X velocidad	0,570575
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	10,4177
135 900	12,87185
Interacción diámetro X longitud	-1,227075
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-3,4882
135 900	-4,14055
Interacción velocidad X longitud	0,326175

Tabla 60. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 6% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	13,0471
1,524	11,7111
Interacción diámetro X velocidad	0,668
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	11,02985
135 900	13,72835
Interacción diámetro X longitud	-1,34925
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-3,54465
135 900	-4,58005
Interacción velocidad X longitud	0,5177

Tabla 61. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 5% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	13,87715
1,524	12,29135
Interacción diámetro X velocidad	0,7429
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	11,65825
135 900	14,61025
Interacción diámetro X longitud	-1,476
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-3,85375
135 900	-4,85535
Interacción velocidad X longitud	0,5008

Tabla 62. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 4% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	14,535
1,524	13,24355
Interacción diámetro X velocidad	0,645725
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	12,3707
135 900	15,40785
Interacción diámetro X longitud	-1,518575
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-4,1621
135 900	-5,01255
Interacción velocidad X longitud	0,425225

Tabla 63. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 3% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	15,63885
1,524	14,3093
Interacción diámetro X velocidad	0,664775
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	13,3452
135 900	16,60295
Interacción diámetro X longitud	-1,628875
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-4,4643
135 900	-5,50975
Interacción velocidad X longitud	0,522725

Tabla 64. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 2% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	17,08035
1,524	15,6708
Interacción diámetro X velocidad	0,704775
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	14,6344
135 900	18,11675
Interacción diámetro X longitud	-1,741175
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-4,6817
135 900	-5,82845
Interacción velocidad X longitud	0,573375

Tabla 65. Efecto de la interacción entre Los parámetros del sistema para una concentración admisible de 1% [p/p] (Diámetro de 12 a 14 in).

Velocidad [m/s]	Efecto medio del diámetro
1,219	19,4307
1,524	17,6732
Interacción diámetro X velocidad	0,87875
Longitud [m]	Efecto medio del diámetro
199 900	16,58735
135 900	20,51655
Interacción diámetro X longitud	-1,9646
Longitud [m]	Efecto medio de la velocidad
199 900	-5,35565
135 900	-6,86625
Interacción velocidad X longitud	0,7553

