



FACULTAD DE INGENIERIA.
"ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA DE SISTEMAS HIDRICOS URBANOS"

PROYECTO DE GRADO

"Análisis de la dilución de concentraciones de NaCl en una unión
tipo cruz"

JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA VALDERRAMA

TESIS DE ESPECIALIZACIÓN

Buitrago León, Iván Alexander.

02/11/2014



A Dios por todas sus bendiciones pasadas, presentes y venideras.

A mi madre y a mi padre, que con su esfuerzo en medio de las dificultades orientaron mi vida con amor y responsabilidad.

A Clara por su amor, apoyo y comprensión; con su ternura y cariño hace de mí un mejor hombre cada día.

A Hugo Forero y Williams Torres quienes han creído en mí en estos últimos años y a quienes debo mi éxito, formación profesional y personal.

A la Universidad de los Andes, a sus docentes y mis compañeros en la especialización, con quienes tuve la oportunidad de compartir y aprender de sus experiencias y conocimientos. Me enorgullece haber estudiado en esta Universidad y haber compartido una parte de mi vida con ellos. Me divertí mucho.

A Sebastián y Alfredo, por su apoyo en mis labores diarias durante este último año.

Contenido

Lista de figuras.....	5
Lista de fotografías.....	6
Lista de gráficas	6
Lista de tablas	7
Lista de ecuaciones	8
1 Introducción.....	1
2 Objetivos.....	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivo particular.....	3
2.3 Objetivo específico	3
3 Justificación.....	4
3.1 Estado del arte: comentarios	5
4 Marco teórico	6
4.1 Análisis de redes de tuberías: redes cerradas.....	6
4.1.1 Método del gradiente	6
4.1.1.1 Descripción matemática.....	7
4.1.1.2 Ejemplo del método.....	8
4.2 Análisis de calidad de agua: concentración de un soluto (NaCl), en un nudo	20
4.2.1 Desinfección	20
4.2.2 Difusión	22
4.3 Modelo de mezcla completa: método tradicional	22
4.4 Modelo de mezcla parcial: concepción moderna.....	23
5 Observaciones sobre el experimento.....	29
5.1 ¿Por qué lo lógico es suponer predominio de mezclas parciales y no totales en una unión? 29	
5.1.1 Caudales confluyentes en una cruz.....	29
5.1.1.1 Primer caso	29
5.1.1.2 Segundo caso	30
5.1.1.3 Tercer caso.....	31
5.1.1.4 Cuarto caso	32
5.1.1.4.1 Tipo a.....	32
5.1.1.4.2 Tipo b.....	33

5.1.2	Mezcla de soluciones acuosas	34
5.1.2.1	Mezcla de soluciones sin reacción química	34
5.1.2.2	Fuerza (impulso), de fluidos que discurren en la cruz.....	36
5.2	Estrategia metodológica para acertar en la solución del objetivo del experimento.....	37
5.2.1	Conservación de la masa en el nudo (cruz)	37
5.2.2	Variables, factores y niveles	38
5.2.3	Metodología propuesta “Estrategia y consideraciones”	39
5.2.3.1	Determinar la función general objetivo	39
5.2.3.2	Determinar las restricciones iniciales para el experimento planeado	39
5.2.3.3	Proponer relaciones entre las variables	39
5.2.3.4	Determinar la ecuación de relación	40
5.2.4	Diagrama de flujo de la estrategia planteada	41
6	Modelo físico y digital	42
6.1	Partes del modelo físico	42
6.2	Modelo digital en EPANET	43
6.3	Instrumentos utilizados en el modelo físico	45
6.3.1	Medidor de agua volumétrico.	45
6.3.1.1	Ajuste de las medidas de caudal	47
6.3.2	Termómetro digital	48
6.3.2.1	Ajuste de las medidas de temperatura	49
6.3.3	Medidor de conductividad	50
6.3.3.1	Ajuste de la medida de conductividad	51
6.3.4	Cámaras de tipo WEB y toma de imágenes.....	51
6.4	Soluto utilizado en el experimento.....	53
6.5	Tuberías y accesorios en PVC	53
7	Desarrollo del experimento y metodología.....	54
7.1	Paso a paso de ejecución de cada prueba del experimento	54
7.2	Escenarios del experimento	55
7.2.1	Escenario #1	56
7.2.2	Escenario #2	56
7.2.3	Escenario #3	56
7.2.4	Escenario #4	56

7.2.5	Escenario #5	56
7.2.6	Escenario #6	57
7.2.7	Escenario #7	57
7.2.8	Escenario #8	57
7.2.9	Escenario #9	57
7.2.10	Escenario #10.....	57
7.2.11	Escenario #11.....	57
7.2.12	Escenario #12.....	57
7.3	Toma de los datos.....	58
7.4	Relación entre la conductividad y la concentración de sal en la solución	59
7.5	Estimación de la viscosidad cinemática y densidad del agua	60
7.6	Cálculos hidráulicos	61
7.7	Cálculos de la conductividad y concentración del soluto	62
7.7.1	Formulación para el cálculo de la concentración a partir de la ecuación de Clifford K. Ho	63
7.7.2	Formulación para el cálculo de la concentración a partir de la ecuación de Pedro Romero-Gómez.....	63
7.8	Calculo de las concentraciones con la estrategia propuesta	65
8	Análisis de los resultados obtenidos	72
8.1	Resultados obtenidos para la concentración C_4	72
8.2	Resultados obtenidos para la concentración C_3	74
8.3	Resultado general C_3 y C_4	76
9	Conclusiones, recomendaciones y comentarios sobre las conclusiones	79
9.1	Conclusiones	79
9.2	Recomendaciones	80
9.3	Comentarios.....	80
9.3.1	Mezclas reales dentro de las uniones en cruz	80
9.3.1.1	Características de las uniones en cruz.....	81
9.3.1.1.1	Consideraciones geométricas por procesos de fabricación.	81
9.3.1.1.2	Consideraciones del método de unión.....	82
9.3.1.1.3	Consideraciones al respecto del material de fabricación.....	83
9.3.2	Aplicación computacional del modelo planteado	83
10	Bibliografía.....	86

10.1	Artículos y otros documentos	86
10.2	Tesis	87
ANEXO No. 1	Datos obtenidos en el experimento.....	88
ANEXO No. 2	Ajuste del error para los medidores de agua usados	107
ANEXO No. 3	Cálculo de caudales.....	109
ANEXO No. 4	Cálculo de parámetros hidráulicos	121
ANEXO No. 5	Relación entre conductividad y concentración de soluto para el agua utilizada en el experimento	133
ANEXO No. 6	Cálculo de la concentración mediante las diferentes ecuaciones estudiadas	134
ANEXO No.7	Lecturas de los medidores de agua	152
ANEXO No.8	Certificados de calibración de los medidores de agua	170

Lista de figuras

Figura 1.	Geometría de la red para el método del gradiente.....	9
Figura 2.	Datos para el desarrollo de los análisis de la red.	10
Figura 3.	Curva de demanda de Cloro.....	22
Figura 4.	Características internas de la tee de PVC de 1” usada como unión en el experimento....	24
Figura 5.	Mayor impulso en la dirección vertical.....	25
Figura 6.	Mayor impulso en la dirección horizontal	25
Figura 7.	Mayor impulso en la dirección vertical.....	27
Figura 8.	Única entrada de flujo con su concentración a la cruz.	30
Figura 9.	Flujo por entradas encontradas hacia el centro de la cruz.	31
Figura 10.	Tres caudales que confluyen en el centro de la cruz.....	32
Figura 11.	Dos caudales de entrada con diferentes concentraciones confluyen en el centro de la cruz sin que exista mezcla	33
Figura 12.	Mezcla parcial dentro de la cruz, cuarto caso.....	34
Figura 13.	Diagrama de flujo de la estrategia planteada	41
Figura 14.	Modelo físico ensamblado.	42
Figura 15.	Traductores de la versión utilizada de EpaNet a español	44
Figura 16.	Modelo digital de EpaNet para la prueba No. 4.....	44
Figura 17.	Identificación de las tuberías de entrada y salida de acuerdo con una base georreferenciada	84
Figura 18.	Diagrama de flujo propuesto para la aplicación computacional del modelo planteado con base en un posicionamiento georreferenciado	85

Lista de fotografías

Fotografía 1. Modelo físico del experimento.	43
Fotografía 2. Medidor volumétrico utilizado para el experimento	45
Fotografía 3. Lecturas iniciales de los medidores para una de las pruebas realizadas.....	46
Fotografía 4. Lecturas finales de los medidores para una de las pruebas realizadas	46
Fotografía 5. Montaje de la cámara web y ajuste de la imagen en el software de video	47
Fotografía 6. Dispositivo termo-resistivo digital utilizado para el experimento	49
Fotografía 7. Lectura de temperatura en el patrón	50
Fotografía 8. Comparación temperatura en el patrón con los equipos termo-resistivos utilizados	50
Fotografía 9. Medidor de conductividad utilizado en el experimento	51
Fotografía 10. Verificación de la lectura de la conductividad respecto a la temperatura del agua según certificación del fabricante.....	51
Fotografía 11. Posicionamiento de la cámara web sobre el medidor de volumen	52
Fotografía 12. Ejecución del experimento y control de los datos	53
Fotografía 13. Solute utilizado.....	53
Fotografía 14. Medición de conductividad y temperatura del agua durante el experimento.....	58
Fotografía 15. Imperfecciones derivadas del proceso de fabricación (cruz PVC soldada).....	81
Fotografía 16. Imperfecciones derivadas del proceso de fabricación (cruz PVC roscada).....	82
Fotografía 17. Imperfecciones derivadas del proceso de fabricación (cruz hierro galvanizado roscada).....	82

Lista de gráficas

Gráfica 1. Convergencia del método del gradiente	19
Gráfica 2. Conservación de la masa	38
Gráfica 3. Corrección del error en porcentaje en el medidor No. 1 - 13 006070	48
Gráfica 4. Relación existente entre la conductividad y la concentración del soluto en el agua	60
Gráfica 5. Relación existente entre la temperatura del agua y su densidad.....	61
Gráfica 6. Relación existente entre la temperatura del agua y su viscosidad cinemática	61
Gráfica 7. Relación encontrada entre la distribución de masas de entrada y de salida de la cruz, en el tiempo	69
Gráfica 8. Exactitud de las ecuaciones estudiadas en relación a la concentración medida para C4. Pruebas que cumplen con las restricciones del modelo. Promedio de las tomas para cada prueba.	73
Gráfica 9. Error calculado para el valor de C4 hallado mediante las diferentes ecuaciones estudiadas respecto a los valores medidos en el experimento. Pruebas que cumplen con las restricciones del modelo.	74
Gráfica 10. Exactitud de las ecuaciones estudiadas en relación a la concentración medida para C3. Pruebas que cumplen con las restricciones del modelo. Promedio de las tomas para cada muestra	75

Gráfica 11. Error calculado para el valor de C3 hallado mediante las diferentes ecuaciones estudiadas respecto a los valores medidos en el experimento. Pruebas que cumplen con las restricciones del modelo. 76

Gráfica 12. Exactitud de las ecuaciones estudiadas en relación a la concentración medida para C4. Todas las pruebas. 77

Gráfica 13. Exactitud de las ecuaciones estudiadas en relación a la concentración medida para C3. Todas las pruebas. 78

Lista de tablas

Tabla 1. Datos de inicio para la primera iteración 13

Tabla 2. Datos para la segunda iteración 19

Tabla 3. Datos de la última iteración 20

Tabla 4. Cálculo del caudal ajustado para la prueba No. 4, toma 2..... 48

Tabla 5. Estado de operación de las válvulas para los diferentes escenarios 54

Tabla 6. Mediciones realizadas durante la ejecución de la prueba No. 4, toma 2 58

Tabla 7. Cálculo de la concentración de soluto como función de la conductividad medida 59

Tabla 8. Relación de la densidad y la viscosidad cinemática del agua con la temperatura 60

Tabla 9. Parámetros hidráulicos calculados para la prueba No. 4, toma 2 62

Tabla 10. Concentración calculada del soluto durante la prueba No. 4, toma 2 y concentraciones calculadas mediante las ecuaciones estudiadas..... 62

Tabla 11. Ecuaciones para el cálculo de C3 y C4 de acuerdo con la relación existente entre Q1 y Q2, según las restricciones planteadas a partir de la ecuación de Ho 63

Tabla 12. Ecuaciones para el cálculo de C3 y C4 de acuerdo con la relación existente entre Q1 y Q2, según las restricciones planteadas a partir de la ecuación de Romero-Gómez 64

Tabla 13. Cálculo de C4 mediante las ecuaciones anteriores 65

Tabla 14. Cálculo de C3 mediante las ecuaciones anteriores 66

Tabla 15. Cumplimiento de las restricciones planteadas..... 68

Tabla 16. Cálculo de la razón entre las masas entrantes y entre las masas salientes con relación al tiempo..... 68

Tabla 17. Cálculo de C4 mediante las ecuaciones estudiadas y la ecuación propuesta, para las pruebas que cumplen las restricciones incluyendo la totalidad de las tomas 71

Tabla 18. Cálculo de C3 mediante las ecuaciones estudiadas y la ecuación propuesta, para las pruebas que cumplen las restricciones incluyendo la totalidad de las tomas 71

Tabla 19. Cálculo de C4 mediante las ecuaciones estudiadas y la ecuación propuesta, para las pruebas que cumplen las restricciones. Promedio de las tomas para cada prueba 72

Tabla 20. Cálculo de C3 mediante las ecuaciones estudiadas y la ecuación propuesta, para las pruebas que cumplen las restricciones. Promedio de las tomas para cada prueba 75

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación de continuidad para cada nudo.....	7
Ecuación 2. Ecuación de balance de energía para cada tubo.....	7
Ecuación 3. Cálculo del factor de fricción f para flujo en transición o turbulento	7
Ecuación 4. Ecuación explícita para el caudal con base en Colebrook-White.....	7
Ecuación 5. Ecuación general que relaciona la altura de energía con el caudal que fluye por la tubería.....	7
Ecuación 6. Ecuación general que relaciona la altura de energía con el caudal que fluye por la tubería, para sistemas sin bombeo ni válvulas de control	8
Ecuación 7. Cálculo del término α	8
Ecuación 8. Cálculo del caudal por el método del gradiente	8
Ecuación 9. Ecuación vectorial del método del gradiente	8
Ecuación 10. Tasa de destrucción de microorganismos en función del agente letal	20
Ecuación 11. Ecuación de cálculo del cloro consumido para la desinfección.....	21
Ecuación 12. Reacción química del cloro con el agua.....	21
Ecuación 13. Reacción química del cloro con el agua.....	21
Ecuación 14. Componentes del ácido hipocloroso	21
Ecuación 15. Componentes del ácido hipocloroso	21
Ecuación 16. Balance de masa para mezcla completa en un nudo	23
Ecuación 17. Balance de masa para mezcla completa en un nudo en WaterCad.....	23
Ecuación 18. Ecuación para la tasa de cambio del impulso	26
Ecuación 19. Criterio del impulso con base en los caudales entrantes y salientes en un nudo.....	26
Ecuación 20. Hipótesis de igualdad de las concentraciones en 1 y 4	27
Ecuación 21. Balance de masa del soluto en una unión	27
Ecuación 22. Balance de masa del soluto en una unión con $C_1 = C_4$	27
Ecuación 23. Cálculo de C_3 en función de caudales y concentraciones conocidas.....	28
Ecuación 24. Variables x y y de acuerdo a la ecuación de Romero-Gómez	28
Ecuación 25. Conservación de masa en un nudo de acuerdo con Romero-Gómez	28
Ecuación 26. Combinación de las ecuaciones 24 y 25 para Q_2 y Q_3	28
Ecuación 27. Combinación de las ecuaciones 24 y 25 para Q_1 y Q_3	28
Ecuación 28. Cálculo de C_3 de acuerdo con las ecuaciones planteadas por Romero-Gómez	28
Ecuación 29. Cálculo de Q_1 según la ecuación de balance de masa	30
Ecuación 30. Ecuación para la mezcla de soluciones sin reacción química de los solutos	35
Ecuación 31. Ecuación para la mezcla de soluciones sin reacción química de los solutos dividida en la unidad de tiempo para el tercer caso	35
Ecuación 32. Cálculo de C_4 con base en la ecuación 31	35
Ecuación 33. Ecuación para la mezcla de soluciones sin reacción química de los solutos dividida en la unidad de tiempo para el cuarto caso.....	35
Ecuación 34. Desarrollo de la metodología de Ho cuando C_1 es igual a C_4 . Paso 1.....	35
Ecuación 35. Desarrollo de la metodología de Ho cuando C_1 es igual a C_4 . Paso 2.....	35
Ecuación 36. Desarrollo de la metodología de Ho cuando C_1 es igual a C_4 . Paso 3.....	35
Ecuación 37. Cálculo de C_3 según la metodología de Ho cuando C_1 es igual a C_4 . Paso 3	35
Ecuación 38. Desigualdad de las concentraciones 1, 2 y 3 en un nudo si C_2 es mayor que C_1	36
Ecuación 39. Desigualdad de las concentraciones 1, 2 y 3 en un nudo si C_2 es menor que C_1	36

Ecuación 40. Segunda ley de Newton	36
Ecuación 41. Integración de la segunda ley de Newton en función del tiempo	36
Ecuación 42. Segunda ley de Newton con base en deltas de tiempo y de velocidad	37
Ecuación 43. Cálculo de la fuerza en función a la densidad del líquido y un volumen de control ...	37
Ecuación 44. Cálculo de la fuerza en función a la densidad del líquido y el caudal	37
Ecuación 45. Cálculo de la fuerza en función al caudal y el área.....	37
Ecuación 46. Conservación de la masa entrante y saliente en un nudo	37
Ecuación 47. Conservación del caudal entrante y saliente en un nudo.....	37
Ecuación 48. Ecuación de balance de la masa en un nudo	38
Ecuación 49. Concentraciones 3 y 4 en función de caudales y concentraciones conocidas	39
Ecuación 50. Relación propuesta en consideración a las restricciones establecidas	39
Ecuación 51. Definición de y y $f(x)$ en función de las relaciones propuestas	40
Ecuación 52. Definición de y como función de x	40
Ecuación 53. Despeje de Q_3C_3 desde las ecuaciones 51 y 52	40
Ecuación 54. Despeje de Q_3C_3 desde la ecuación de balance de la masa en un nudo	40
Ecuación 55. Reemplazo de $f(x)$ en la ecuación 54. Paso 1	40
Ecuación 56. Reemplazo de $f(x)$ en la ecuación 54. Paso 2	40
Ecuación 57. Reemplazo de $f(x)$ en la ecuación 54. Paso 3	40
Ecuación 58. Despeje de C_4 con base en la relación propuesta	40
Ecuación 59. Despeje de C_3 con base en la relación propuesta	41
Ecuación 60. Cálculo del caudal medido en cada una de las pruebas	46
Ecuación 61. Ecuación de balance de masas en un nudo	63
Ecuación 62. Cálculo de C_3 desde la ecuación de balance de masas en un nudo, según Ho	63
Ecuación 63. Cálculo de C_4 desde la ecuación de balance de masas en un nudo, según Ho	63
Ecuación 64. Cálculo de C_3 según Romero-Gómez	64
Ecuación 65. Cálculo de C_4 según Romero-Gómez	64
Ecuación 66. Cálculo del error respecto a las concentraciones medidas en el experimento	64
Ecuación 67. Relación propuesta para el experimento	67
Ecuación 68. Ecuación que relaciona Q_1C_1/Q_2C_2 con Q_3C_3/Q_4C_4	69
Ecuación 69. Desarrollo de la ecuación 68. Paso 1	69
Ecuación 70. Despeje de Q_3C_3 con base en las relaciones propuestas	69
Ecuación 71. Despeje de Q_3C_3 desde la ecuación estándar para las soluciones acuosas	69
Ecuación 72. Igualación de las ecuaciones 70 y 71	69
Ecuación 73. Cálculo de C_4 con base en las relaciones propuestas	70
Ecuación 74. Despeje de Q_4C_4 con base en las relaciones propuestas	70
Ecuación 75. Despeje de Q_4C_4 desde la ecuación estándar para las soluciones acuosas	70
Ecuación 76. Igualación de las ecuaciones 74 y 75. Paso 1	70
Ecuación 77. Igualación de las ecuaciones 74 y 75. Paso 2	70
Ecuación 78. Cálculo de C_3 con base en las relaciones propuestas	70



Universidad de los Andes
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA
*“Análisis de la mezcla de concentraciones en una unión de tuberías tipo
cruz de soluciones de NaCl”*



1 Introducción

El agua es un elemento especial para el desarrollo de la vida y de vital importancia para el hombre, está presente en muchos aspectos de su vida diaria, en la salud, no solo regula en gran medida el sistema endocrino del cuerpo, agua contaminada y consumida es la responsable enfermedades como el cólera, la fiebre tifoidea, diarreas y gastroenteritis entre otras, y vector de otras como dengue y la malaria¹. En el desarrollo con equidad, el suministro de agua potable es la base de la igualdad social en la prestación de los servicios públicos. En el ámbito industrial el agua hace parte de la mayoría de procesos productivos industriales modernos, ya sea como materia prima, insumo directo del producto o bien necesario para regular o controlar los diferentes procesos. El agua en sí es el motor del desarrollo y crecimiento poblacional.

Dada la importancia del agua, una gran cantidad de recursos (económicos y humanos), se invierte en todo el mundo para abastecer de agua potable a toda la población, no solo en sistemas nuevos de captación, purificación, almacenamiento, transporte y distribución del agua potable, también en el mantenimiento, rehabilitación y actualización técnica de la estructuras existentes, siendo la operación y mantenimiento de la red de distribución uno de los rubros que más pesa en la estructura tarifaria.

Las empresas de agua potable en la actualidad se apoyan en programas informáticos que ayudan a desarrollar modelos virtuales de la red de distribución, que les permita su fácil operación hidráulica y apreciación de la calidad del agua distribuida. La confiabilidad y grado de exactitud de estos programas tiene un alto grado de responsabilidad social en la medida que con base en los resultados emitidos por los mismos se toman decisiones que afectan la salud de la población atendida.

Según explica Clifford K. Ho², En la actualidad el transporte de solutos en los sistemas de distribución de agua es una preocupación creciente debido a la posibilidad de eventos de contaminación accidental o intencional. Tal como lo menciona Ho, la comprensión de cómo los solutos se mueven y se mezclan a través de una red de tuberías y uniones es crítica para el desarrollo planes de mitigación que deberían producirse un evento de contaminación.

Este documento contiene una recopilación básica del estado del arte en la evaluación de la mezcla de aguas con diferentes o iguales concentraciones de un soluto, que permitan establecer una

¹ Según la Unesco, las enfermedades relacionadas con el agua matan a un niño cada 8 segundos y, son responsables del 80% de todas las enfermedades y muertes de los países en vías de desarrollo; cobran la vida de más de 5 millones de personas cada año, más de 10 veces el número de personas que mueren a causa de los conflictos armados. La diarrea está causada por una serie de microorganismos que incluyen virus, bacterias y protozoos. Esta enfermedad provoca que una persona pierda agua y electrolitos, lo que conduce a la deshidratación y, en algunos casos, a la muerte. Unos 4.000 millones de casos de diarrea al año causan 1,8 millones de víctimas mortales, más del 90% de los cuales (1,6 millones) son niños menores de cinco años. Recuperado el 2 de diciembre de 2013 de UNESCO:

http://www.unesco.org/water/news/newsletter/161_es.shtml#know

² Ho, Clifford. (2008). *Solute Mixing Models for Water-Distribution Pipe Networks*. Recuperado el de octubre de 2013, de ASCE: <http://gsgc.gzhu.edu.cn/gpsgd/UploadFile/200942623229730.pdf>

aproximación al proceso de mezcla en cruces de tuberías, así como una propuesta metodológica con base en un modelo físico desarrollado para este proyecto, que relaciona la teoría actual de mezcla completa y parcial, para determinar la concentración del soluto en las tuberías de salida de los cruces en redes de distribución de agua potable.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar un experimento que permita a través de un modelo físico estudiar la mezcla de agua con diferentes concentraciones de NaCl al discurrir a través de un accesorio (cruz comercial), e interpretar los resultados de las concentraciones resultantes a la luz de las teorías actuales.

2.2 Objetivo particular

Conocer e interpretar el comportamiento del agua que fluye a través de una unión tipo cruz, con diferentes grados de concentración de NaCl y caudal que discurre

2.3 Objetivo específico

Plantear con base en los resultados obtenidos una metodología nueva que permita estimar las concentraciones de NaCl de salida de la cruz, tomando como base las teorías actuales y buscando una relación con las medidas realizadas. Metodología que permita determinar ecuaciones que estimen concentraciones de salida de NaCl y su aplicación a sistemas informáticos de modelación de redes de distribución de agua potable a presión.

3 Justificación

En cada país, el gobierno de la nación tiene como obligación velar por la integridad y salud de sus ciudadanos, siendo el abastecimiento y distribución de agua potable uno de los pilares de la salud pública. En Colombia, a través del decreto 1575 del 9 de mayo de 2007, se establece el sistema de protección y control de la calidad del agua para consumo humano, esto con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por el consumo de agua. El agua potable o para consumo humano, tiene que cumplir con las características físicas, químicas y microbiológicas, en las condiciones señaladas en el decreto y demás legislación complementaria.

Para el control de la calidad de agua en la red de distribución, el gobierno Colombiano a través del Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, expidieron la Resolución número 0811 DE 2008, “por medio de la cual se definen los lineamientos a partir de los cuales la autoridad sanitaria y las personas prestadoras, concertadamente definirán en su área de influencia los lugares y puntos de muestreo para el control y la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en la red de distribución”. El cumplimiento de esta resolución, implica por parte de los prestadores del servicio de agua potable una labor técnica idónea para la ubicación de los puntos de muestreo; esto involucra el uso de un modelo hidráulico de la red que ayude a identificar los puntos más críticos y con deficiencias en la calidad del agua distribuida.

La ubicación técnica e idónea de los puntos de muestreo se debe hacer con la ayuda de programas informáticos que permita hacer un modelo virtual de la red de distribución, entender su hidráulica y relación de esta última con la variación de la calidad del agua en cualquier punto de la red. Una ubicación errada conlleva elevados costos de ensayos en laboratorios acreditados, un control ineficiente de la calidad del agua en la red, conflictos entre el prestador del servicio y los entes de control, desconfianza y conflictos internos entre las dependencias de la empresa prestadora del servicio; producción de agua con la de operación de la red (encargados de la distribución de agua) e inconformidad de los usuarios por la calidad del servicio prestado.

Como se mencionó anteriormente, la confiabilidad y grado de exactitud de estos programas tiene un alto grado de responsabilidad social en la medida que con base en los resultados emitidos por los mismos se toman decisiones que afectan la salud de la población atendida.

Si bien se considera, que el tema del modelo matemático que soporta la hidráulica de una red de distribución la cual permite hacer un modelo computacional de la misma, es un tema abordado con profundidad, tiene el inconveniente que para crear la malla de distribución del agua en el modelo y hallar su solución numérica no profundiza en el comportamiento del agua a través de los nudos que dan forma a la malla evaluada. Esto trae como consecuencia que aunque hidráulicamente el problema de la modelación esté resuelto, la valoración de la calidad del agua en la red y de manera más precisa el transporte de solutos por la misma aun no tenga una solución satisfactoria que represente de manera sustancial la realidad.

Tal como lo menciona Clifford K. Ho, la comprensión de cómo los solutos se mueven y se mezclan a través de una red de tuberías y uniones es crítica. Conocer el comportamiento de los solutos

que discurren por las uniones de las tuberías en el modelo y como relacionar los resultados de estos análisis con las redes de distribución de agua potable existentes, permitirán a los usuarios de estos programas informáticos ajustar sus modelos con las redes existentes y con base en los resultados obtenidos tomar acciones en tiempo real para; eventos de contaminación de la red, ubicación de los puntos de control sobre la misma u operación de la red, tomando en cuenta las variaciones de la calidad del agua derivadas a la manipulación de válvulas o variación de los circuitos de distribución.

Lo esencial en todo modelo es la representación más cercana de la realidad a través de una representación conceptual y gráfica de lo estudiado; el éxito de todo modelo depende del grado de exactitud con el que se relacionen las variables que intervienen en el modelo con la realidad y el grado de precisión con el cual estas variables soporten el modelo en el tiempo. Conocer con claridad, e interpretar de manera correcta el comportamiento físico y químico del agua que discurre a través de tuberías y accesorios de una red, fortalecerán los modelos brindando una mayor confiabilidad a los usuarios de los mismos.

3.1 Estado del arte: comentarios

En la actualidad el campo de la modelación hidráulica de redes de distribución de agua potable ha llegado a un punto en el cual el avance científico y tecnológico de la concepción hidráulica del problema del modelo de distribución ya ha sido resuelto. En la medida que este problema de la modelación de la redes de distribución de agua potable ha sido resuelto para su hidráulica, hasta hace unos años la investigación referente al comportamiento de las partículas que están contenidas en el agua transportada y su comportamiento (mezcla, degradación, reacciones), al pasar a través de diferentes estructuras de control y accesorios (válvulas y conexiones), de la red misma ha evolucionado.

Diferentes investigadores, en trabajos de tesis para Maestría o Doctorado han abordado el tema de la mezcla o el transporte de sustancias en redes de distribución, y sus mezclas y reacciones, estas han arrojado resultados que a través de los modelos hidráulicos convencionales no se hubieran podido evidenciar.

El comportamiento de la mezcla de sustancias y/o partículas en accesorios y en especial en cruces de tuberías ha sido estudiado de manera dedicada solo en los últimos años; esto en cierta medida es coherente ya que sólo en la última década el costo de los instrumentos e instalaciones de ensayo con sistemas de medición en línea de parámetros de calidad de agua y medición de presión, caudal y volumen han bajado, facilitando su adquisición. Por otra parte, en la misma medida en que los costos de adquisición tecnológica han bajado, la capacidad metrológica de los mismos (sensibilidad, resolución, exactitud, baja incertidumbre entre otros), ha aumentado, permitiendo analizar los procesos de mezcla de manera más exacta y evidenciando la relación entre las diferentes variables envueltas en el tema de estudio.

4 Marco teórico

Para el análisis de calidad de agua en redes de distribución, se deben considerar en el modelo los dos componentes que interactúan; el primero que hace referencia al modelo hidráulico y el segundo que corresponde al modelo de calidad de agua, ambos con las ecuaciones que los componen.

El modelo hidráulico tiene como base el método del gradiente y las ecuaciones que los soportan y el modelo de calidad de agua incluye los modelos de mezcla completa y de mezcla parcial. De manera alterna con lo anterior se debe conocer la relación que existe entre el modelo hidráulico y el modelo de calidad de agua.

4.1 Análisis de redes de tuberías: redes cerradas

Una red de tuberías es analizada para determinar dos variables características del sistema: los caudales que fluyen por sus tuberías y las alturas de presión en cada uno de sus nudos. Dado que la demanda de agua cambia con el tiempo, los caudales en las tuberías y las presiones en los nudos también cambian con esta. El análisis de la red se realiza entonces con el ánimo de conocer en cada instante los valores de caudal y presión en los diferentes puntos y tramos de la red, ya sea para el diseño de un sistema nuevo, la mejora de un sistema existente, rehabilitación de zonas específicas de la red o simplemente para las maniobras de operación que se presentan en el día a día. Tal como lo comenta Prabhata K. Swamee³, el análisis de redes es fundamental para la operación y mantenimiento adecuado de un sistema de suministro de agua potable.

El modelo hidráulico permite analizar la red como un todo. Aunque existen diferentes metodologías reportadas por la literatura técnica para el análisis de redes de tuberías, en este documento solamente se menciona el método más usado, confiable y físicamente basado, que corresponde al método del gradiente hidráulico.

El método del gradiente realiza un análisis a régimen permanente del fluido dentro de la red de distribución de agua, tomando como base la conservación de masa en nudos y la conservación de la energía en los circuitos del sistema. Todo lo anterior bajo la presunción que; el fluido es incompresible, está fluyendo a régimen permanente, esta en una sola fase, esta presurizado y que los cambios en la temperatura, densidad y viscosidad son mínimos y no afectan el cálculo de manera significativa.

4.1.1 Método del gradiente

Es sin duda el método más extendido para la resolución de las ecuaciones que conforman una red de tuberías cerradas, se basa en una formulación híbrida entre la formulación por nudos y formulación por tuberías. Originalmente el método fue desarrollado por los profesores E. Todini y

³ Swamee, P.K. & Sharma A.K. (2.007). *Design of Water Supply Pipe Networks*. New Jersey: John Wiley & Sons, INC.

Pilati en 1987 y posteriormente fue ampliado en su uso y aplicación por Salgado en 1.993. Este método es bastante similar al planteado por Hamman y Drameller en 1971; tal como lo describe García-Serra ambos métodos obtienen para cada iteración los valores de las aturas de las piezométricas en los nudos, y antes de proceder con la siguiente iteración en la resolución del sistema debe obtenerse también los caudales de las tuberías.

4.1.1.1 Descripción matemática

Como se comentó anteriormente, el método toma como base el hecho que las redes de los sistemas de distribución de agua trabajan de manera continua y su flujo es permanente, cumpliendo con la conservación de masa en los nudos y la conservación de energía en los circuitos, contemplando las siguientes condiciones⁴:

1. Ecuación de continuidad para cada nudo

$$\sum_{j=1}^{NTi} Q_{ij} - Q_{Di} + Q_{ei} = 0 \quad \text{Ecuación 1}$$

2. Ecuación de balance de energía para cada tubo

$$H_t = \frac{v^2}{2g} \cdot \left(f \cdot \frac{l}{d} + \sum k_m \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

El factor de fricción f se calcula con la siguiente ecuación (para flujo en transición o turbulento)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

3. Relación no lineal entre el caudal y las pérdidas por fricción para cada tubo

$$Q = -2 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot d \cdot h_f}{l}} \cdot \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7 \cdot d} + 2.5 \cdot l \cdot v \cdot \sqrt{\frac{l}{2 \cdot g \cdot d^3 \cdot h_f}} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

En el caso que la red contenga dispositivos que modifiquen las condiciones de caudal o presión, tales como bombas o válvulas de control, la Ecuación 2, toma la siguiente forma, válida para todo tipo de tubería.

$$H = \alpha Q_i^n + \beta Q + \gamma \quad \text{Ecuación 5}$$

⁴ Saldarriaga V. Juan G. (2009). *Hidráulica de tuberías: Abastecimiento de Agua, Redes y Riegos*. Bogotá: Alfaomega.

Si no existen bombas o válvulas de control en la red analizada la ecuación 5, se simplifica así;

$$H = \alpha Q_i^n \quad \text{Ecuación 6}$$

donde el término α , se calcula de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\left(f \cdot \frac{l}{d} + \sum k_m\right)}{2 \cdot g \cdot A^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

4.1.1.2 Ejemplo del método⁵

Este método busca una representación matemática con una aproximación lineal de las ecuaciones de energía. De acuerdo con Saldarriaga, las ecuaciones se resuelven utilizando un esquema imaginativo que se basa en la inversión de la matriz de coeficientes originales.

El método del gradiente resuelve un sistema de dimensión NN x NN, mientras que el método de la teoría lineal resuelve un sistema de NT x NT. Debido a que NN < NT, el método del gradiente llega a una solución más rápida, calculando y ajustando simultáneamente los caudales y las alturas piezométricas, dado que no requiere la definición de caminos de energía o circuitos, implica menor número de datos que el diseñador debe ingresar y a la vez menor probabilidad de error.

Para el cálculo del caudal se utiliza la siguiente ecuación:

$$[Q_{j+1}] = \{[I] - ([N^{-1}][A11]) - [A11]\}[Q_i] - \{([N][A11])^{-1}([A12][H_{i+1}] + [A10][H_0])\} \quad \text{Ecuación 8}$$

El vector final de cálculo es:

$$\{[A21]([N][A11])^{-1}[A12]\}[H_{i+1}] = -\{[A21]([N][A11])^{-1}([A11][Q_i] + [A10][H_0]) - ([A21][Q_i] - [q])\} \quad \text{Ecuación 9}$$

Para mayor comprensión del método se desarrollara un ejercicio paso a paso

1. Convención de signos

Las convenciones usadas son las siguientes:



⁵ Fuente: ejercicio de Hidráulica de tuberías 2013, desarrollado por el autor.

Con relación al sentido de circulación del agua dentro de cada circuito de la red, su valor su signo será positivo si este es tomado en el mismo sentido en que rotan las manecillas de un reloj.



Para el caso de los nudos, todo caudal que entre al nudo se considera con signo positivo y todo caudal que salga del nudo se considera con signo negativo.

- Las propiedades del fluido para el desarrollo del ejemplo son evaluadas con agua a 15°C, con las siguientes características:

$$\rho = 999.1 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.14 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\vartheta = 1.141 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

- Para las tuberías se tomó el valor del diámetro interno efectivo del tubo como el valor dado en el esquema de la red y con un valor de;

$$k_s = 0,046 \text{ mm}$$

La geometría de la red se muestra en la siguiente grafica;

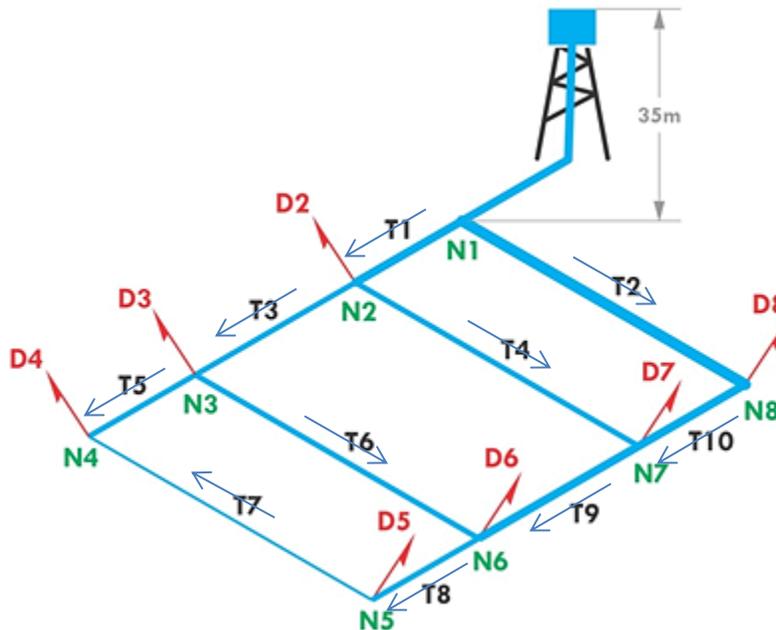
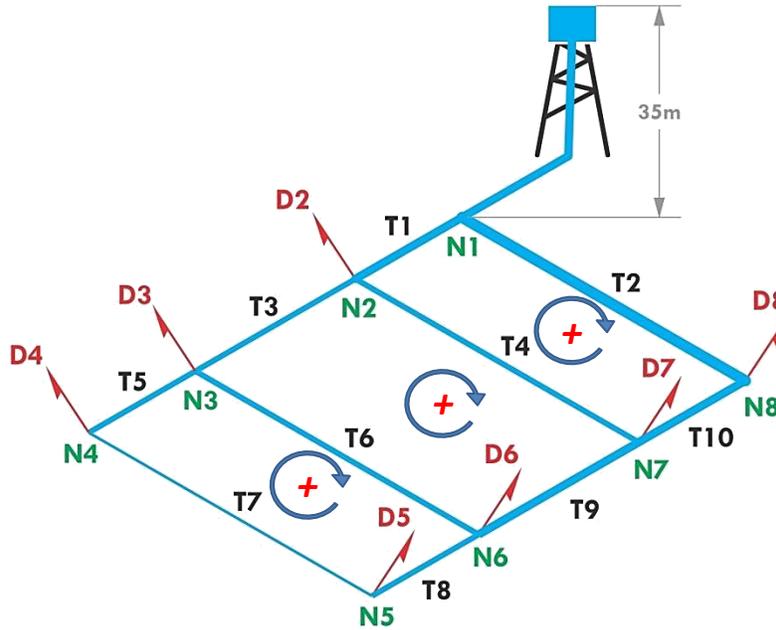


Figura 1. Geometría de la red para el método del gradiente.



TUBERÍA	Ks (mm)	DN (mm)	L (m)	Km -	COTA NODO (m.s.n.m)	DEMANDA (L/s)
T1	0,046	250	100	4,3	N1 1150	D2 35
T2	0,046	300	230	7,4	N2 1144	D3 40
T3	0,046	200	150	5,1	N3 1140	D4 55
T4	0,046	200	230	7,2	N4 1136	D5 23
T5	0,046	200	100	4,3	N5 1131	D6 76
T6	0,046	200	230	7,2	N6 1127	D7 48
T7	0,046	150	230	6,8	N7 1134	D8 64
T8	0,046	200	100	4,3	N8 1141	
T9	0,046	250	150	5,1		
T10	0,046	250	100	4,3		

Figura 2. Datos para el desarrollo de los análisis de la red.

4. Inicio del procedimiento de análisis

En el proceso de cálculo de la red por el método del gradiente se siguen los siguientes pasos; Se suponen el caudal para cada tubo, en este caso 1,1 L/s, para todos los tubos.

Número de tubos	NT = 10 tuberías
Número de nudos de presión desconocida	NN = 7 nudos
Número de nudos de presión conocida	NS = 1 nudo

Se define la matriz de conectividad (NT x NN); el valor de 1 corresponde al nudo de llegada y el -1 al nudo de salida de la tubería en análisis (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), luego se escribe la matriz transpuesta de matriz de conectividad.

[A12] Matriz de conectividad (10 X 7)

	N 2	N 3	N 4	N 5	N 6	N 7	N 8
T 1	1	0	0	0	0	0	0
T 2	0	0	0	0	0	0	1
T 3	-1	1	0	0	0	0	0
T 4	-1	0	0	0	0	1	0
T 5	0	-1	1	0	0	0	0
T 6	0	-1	0	0	1	0	0
T 7	0	0	1	-1	0	0	0
T 8	0	0	0	1	-1	0	0
T 9	0	0	0	0	1	-1	0
T 10	0	0	0	0	0	1	-1

[A21] Matriz transpuesta (7 X 10)

1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-1	-1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0	-1	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	-1	1
0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1

Se define la matriz topológica, tramo a nudo para los NS nudos de altura piezométrica fija; su dimensión es NT x NS. El valor -1 en la fila corresponde a tuberías conectadas a un nudo con altura piezométrica fija.

Se define el vector de caudales para cada tubería, su dimensión es NT x 1. El valor allí escrito es la semilla de caudal con el cual el método inicia su proceso de iteración.

Se define el vector de alturas piezométricas desconocidas, su dimensión es NN x 1.

Se define el vector de alturas piezométricas fijas, su dimensión es NS x 1.

Se define el vector de consumos, en cada nudo de la red, su dimensión es, NN x 1

- [A10] Matriz topológica (10 X 1)**
[Q] Vector de caudales (-) sentido de flujo (10 X 1)
[H] Vector de alturas piezométricas desconocidas (7 X 1)
[Ho] Vector de alturas piezométricas fijas (1 X 1)
[q] Vector de consumos (7 X 1)

[A10] (10 X 1)	[Q] (10 X 1)	[H] (7 X 1)	[Ho] (1 X 1)	[q] (7 X 1)
-1	0,0011	H2	35	-0,035
-1	0,0011	H3		-0,040
0	0,0011	H4		-0,055
0	0,0011	H5		-0,023
0	0,0011	H6		-0,076
0	0,0011	H7		-0,048
0	0,0011	H8		-0,064
0	0,0011			
0	0,0011			
0	0,0011			
0	0,0011			

Se define una matriz diagonal con dimensión NT x NT, en cuya línea diagonal se escriben el coeficiente de la ecuación de Darcy – Weisbach. Para este caso de 2.

[N] Matriz de coeficientes Darcy - Weisbach (10 X 10)

T 1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T 2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
T 3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
T 4	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
T 5	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
T 6	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
T 7	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
T 8	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
T 9	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
T 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Se define la matriz identidad, con dimensión NT x NT.

[I] Matriz identidad (10 X 10)

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1



Con el caudal supuesto en cada tubería y los datos suministrados en el enunciado del ejercicio, se procede a valuar los parámetros hidráulicos que darán inicio a la primera iteración, tal como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de inicio para la primera iteración

TUBERÍA j - i	CAUDAL (m ³ /s)	DIÁMETRO (m)	REYNOLDS	f	LONGITUD (m)	COEFIC. km	VEL. m/s	ÁREA m ²	h _f + Σh _m (m)	α
1 - 2	0,0011	0,25	4910	0,0378	100	4,3	0,02	0,049	4,97E-04	410,7
1 - 8	0,0011	0,30	4092	0,0398	230	7,4	0,02	0,071	4,68E-04	386,7
2 - 3	0,0011	0,20	6137	0,0356	150	5,1	0,04	0,031	1,99E-03	1640,6
2 - 7	0,0011	0,20	6137	0,0356	230	7,2	0,04	0,031	3,01E-03	2483,6
3 - 4	0,0011	0,20	6137	0,0356	100	4,3	0,04	0,031	1,38E-03	1140,2
3 - 6	0,0011	0,20	6137	0,0356	230	7,2	0,04	0,031	3,01E-03	2483,6
5 - 4	0,0011	0,15	8183	0,0330	230	6,8	0,06	0,018	1,13E-02	9372,2
6 - 5	0,0011	0,20	6137	0,0356	100	4,3	0,04	0,031	1,38E-03	1140,2
7 - 6	0,0011	0,25	4910	0,0378	150	5,1	0,02	0,049	7,11E-04	587,5
8 - 7	0,0011	0,25	4910	0,0378	100	4,3	0,02	0,049	4,97E-04	410,7

El valor de cada coeficiente corresponde a la multiplicación del caudal por α

[A11] Matriz de coeficientes (10 X 10)

0,452	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,425	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1,805	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	2,732	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1,254	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2,732	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	10,309	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1,254	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,646	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,452

Se transpone la matriz calculada anteriormente

[A11]' Matriz de coeficientes (10 X 10)

0,452	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,425	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1,805	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	2,732	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1,254	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2,732	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	10,309	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1,254	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,646	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,452

Se multiplica la matriz de coeficiente de Darcy con la matriz transpuesta anterior.

$([N] [A11]')$ $(10 \times 10) (10 \times 10)$
 (10×10)

0,904	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,851	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	3,609	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	5,464	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	2,509	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	5,464	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	20,619	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	2,509	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1,293	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,904

Se halla la matriz inversa de la anterior.

$([N] [A11]')^{-1}$ $(10 \times 10) (10 \times 10)$
 (10×10)

1,107	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1,175	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,277	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,183	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,399	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,183	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,048	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,399	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,774	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,107

Se multiplica la matriz transpuesta de la conectividad con la matriz anterior (matriz base 1)

$[A21] ([N] [A11]')^{-1}$ $(7 \times 10) (10 \times 10)$
 (7×10)

1,10671	0	-0,27706	-0,18302	0	0	0	0	0	0
0	0	0,27706	0	-0,39864	-0,18302	0	0	0	0
0	0	0	0	0,39864	0	0,0485	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-0,0485	0,39864	0	0
0	0	0	0	0	0,18302	0	-0,39864	0,77366	0
0	0	0	0,18302	0	0	0	0	-0,77366	1,10671
0	1,17535	0	0	0	0	0	0	0	-1,10671

La matriz anterior se multiplica por la matriz de conectividad

$$[A21] ([N] [A11]')^{-1} [A12] \quad (7 \times 10) (10 \times 7)$$

$$(7 \times 7)$$

1,56678	-0,277056	0	0	0	-0,18301	0
-0,27706	0,858718	-0,39864	0	-0,18302	0	0
0	-0,398644	0,44714	-0,0485	0	0	0
0	0	-0,0485	0,44714	-0,39864	0	0
0	-0,183018	0	-0,39864	1,35533	-0,77366	0
-0,18302	0	0	0	-0,77366	2,06338	-1,10671
0	0	0	0	0	-1,10670	2,28206

Se halla inversa de la matriz calculada anteriormente y se multiplica por -1 (Matriz base 2)

$$- ([A21] ([N] [A11]')^{-1} [A12])^{-1} \quad (7 \times 10) (10 \times 7)$$

$$(7 \times 7)$$

-0,770	-0,574	-0,550	-0,353	-0,329	-0,259	-0,126
-0,574	-2,824	-2,658	-1,293	-1,127	-0,640	-0,310
-0,550	-2,658	-4,780	-1,610	-1,224	-0,686	-0,333
-0,353	-1,293	-1,610	-4,216	-2,024	-1,068	-0,518
-0,329	-1,127	-1,224	-2,024	-2,122	-1,115	-0,541
-0,259	-0,640	-0,686	-1,068	-1,115	-1,251	-0,607
-0,126	-0,310	-0,333	-0,518	-0,541	-0,607	-0,732

Se multiplica la matriz del número de tuberías con el vector de caudal, a su vez se multiplica la matriz topológica por el vector de alturas piezométricas fijas, luego se suman estas dos matrices. (Matriz base 3)

$$[A11] [Q] \quad [A10] [Ho] \quad [A11] [Q] + [A10] [Ho]$$

$$(10 \times 1) \quad (10 \times 1) \quad (10 \times 1)$$

0,0005	-35,0	-35,000
0,0005	-35,0	-35,000
0,0020	0,0	0,002
0,0030	0,0	0,003
0,0014	0,0	0,001
0,0030	0,0	0,003
0,0113	0,0	0,011
0,0014	0,0	0,001
0,0007	0,0	0,001
0,0005	0,0	0,000

Se multiplica la matriz base 1 por la matriz base 2, y a este resultado se le suma el resultado de la multiplicación de la matriz transpuesta de la conectividad por el vector de caudales y se le resta el vector de consumos. (Matriz base 4)

$$\begin{matrix}
 ([A21] ([N] [A11]')^{-1} ([A11] [Q] + [A10] [Ho]) - \\
 (7 \times 1)
 \end{matrix}
 \begin{matrix}
 [A21] [Q] \\
 (7 \times 1)
 \end{matrix}
 -
 \begin{matrix}
 [q] \\
 (7 \times 1)
 \end{matrix}
 =
 \begin{matrix}
 [R] \\
 (7 \times 1)
 \end{matrix}$$

-38,735
-0,001
0,001
0,000
0,001
0,001
-41,137

-0,0011
-0,0011
0,0022
0,0000
0,0011
0,0011
0,0000

-0,035
-0,040
-0,055
-0,023
-0,076
-0,048
-0,064

-38,699
0,041
0,054
0,023
0,075
0,047
-41,073

Se multiplica la matriz base 2 con la matriz base 4, y se determinan así las alturas piezométricas.

ALTURAS PIEZOMÉTRICAS

$$[H_{i+1}] = - ([A21] ([N] [A11]')^{-1} [A12])^{-1} ([R])$$

(7 X 1)

34,87
34,56
34,43
34,51
34,58
34,72
34,84

Se multiplica la matriz de conectividad con la matriz de las alturas piezométricas, encontrada anteriormente, a este resultado se le suma el resultado de la multiplicación de la matriz topológica por el vector de alturas piezométricas fijas dando como resultado la matriz R2.

Se halla la inversa de la multiplicación de la matriz diagonal de coeficientes de Darcy con la matriz diagonal, este resultado se multiplica por la matriz R2. (Matriz base 5)

CAUDALES

$$\begin{matrix}
 [A12] [H_{i+1}] \\
 (10 \times 1)
 \end{matrix}
 +
 \begin{matrix}
 [A10] \\
 [H_0] \\
 (10 \times 1)
 \end{matrix}
 =
 \begin{matrix}
 [R2] \\
 (10 \times 1)
 \end{matrix}
 \quad
 \begin{matrix}
 ([N] [A11]')^{-1} ([R2]) \\
 (10 \times 1)
 \end{matrix}$$

34,866	-35,00	-0,134	-0,1479
34,837	-35,00	-0,163	-0,192
-0,309	0,00	-0,309	-0,08574
-0,145	0,00	-0,145	-0,02661
-0,125	0,00	-0,125	-0,04988
0,026	0,00	0,026	0,00468
-0,083	0,00	-0,083	-0,00402
-0,068	0,00	-0,068	-0,02702
-0,139	0,00	-0,139	-0,10716
-0,116	0,00	-0,116	-0,128

Se halla la inversa de la multiplicación de la matriz diagonal de coeficientes de Darcy con la matriz diagonal y se multiplica nuevamente por la matriz diagonal.

$$\begin{matrix}
 ([N] [A11]')^{-1} [A11] \\
 (10 \times 10)
 \end{matrix}$$

0,500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,500	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,500	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,500	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,500	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,500	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,500	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,500	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,500	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,500

A la matriz identidad se le resta la matriz hallada anteriormente

$$[I] - ([N] [A11]')^{-1} [A11]$$

(10 X 10)

0,500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,500	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,500	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,500	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,500	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,500	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,500	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,500	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,500	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,500

Se multiplica la matriz anterior por el resultado de la multiplicación de la matriz diagonal de coeficiente por el vector de caudales.

Finalmente el caudal calculado en cada tubería corresponde a la resta de la matriz calculada anteriormente menos la matriz base 5.

$$([I] - ([N] [A11]')^{-1} [A11]) ([A11] [Q])$$

(10 X 1)

0,00055
0,00055
0,00055
0,00055
0,00055
0,00055
0,00055
0,00055
0,00055
0,00055

j - i	TUBERÍA	
	(m ³ /s)	L/s
1 - 2	0,1484	148,45
1 - 8	0,1926	192,55
2 - 3	0,0863	86,29
2 - 7	0,0272	27,16
3 - 4	0,0504	50,43
3 - 6	-0,0041	-4,13
5 - 4	0,0046	4,57
6 - 5	0,0276	27,57
7 - 6	0,1077	107,71
8 - 7	0,1286	128,55

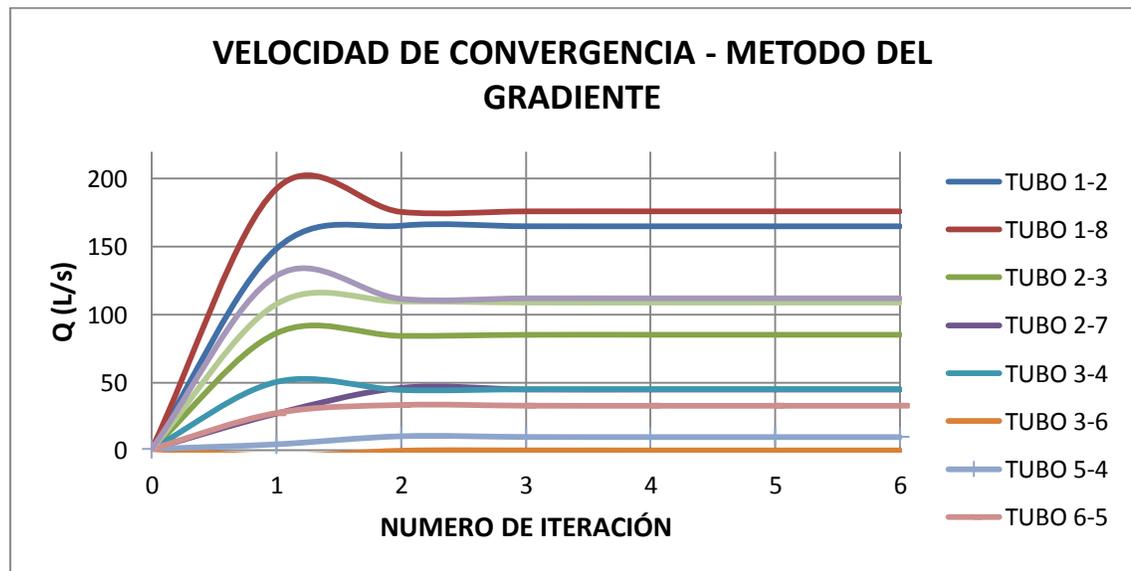
Con los caudales estimados se inicia la segunda iteración.

Los caudales estimados en la primera iteración son la semilla para determinar el valor del coeficiente α , el cual se usara como base de la matriz [A11] en el nuevo cálculo.

Tabla 2. Datos para la segunda iteración

TUBERÍA j - i	CAUDAL (m ³ /s)	DIÁMETRO (m)	REYNOLDS	f	LONGITUD (m)	COEFIC. km	VEL. m/s	ÁREA m ²	h _f + Σh _m (m)	α
1 - 2	0,1484	0,25	662618	0,0149	100	4,3	3,02	0,049	4,79E+00	217,3
1 - 8	0,1926	0,30	716223	0,0145	230	7,4	2,72	0,071	7,00E+00	188,9
2 - 3	0,0863	0,20	481471	0,0158	150	5,1	2,75	0,031	6,50E+00	873,4
2 - 7	0,0272	0,20	151519	0,0180	230	7,2	0,86	0,031	1,06E+00	1441,8
3 - 4	0,0504	0,20	281362	0,0166	100	4,3	1,61	0,031	1,65E+00	649,7
3 - 6	-0,0041	0,20	23070	0,0243	230	7,2	-0,13	0,031	3,11E-02	1817,8
5 - 4	0,0046	0,15	34014	0,0248	230	6,8	0,26	0,018	1,53E-01	7314,7
6 - 5	0,0276	0,20	153838	0,0180	100	4,3	0,88	0,031	5,22E-01	687,0
7 - 6	0,1077	0,25	480760	0,0153	150	5,1	2,19	0,049	3,51E+00	302,6
8 - 7	0,1286	0,25	573797	0,0151	100	4,3	2,62	0,049	3,61E+00	218,7

Se repite este procedimiento hasta verificar que el sistema ha convergido con base en un valor de un error de exactitud entre el penúltimo y último caudal; para este ejemplo el método llegó a un valor aceptable en la sexta iteración. La velocidad de con la que converge el método para este ejemplo por tubería se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Gráfica 1. Convergencia del método del gradiente

Tabla 3. Datos de la última iteración

TUBERÍA j - i	CAUDAL (m ³ /s)	DIÁMETRO (m)	REYNOLDS	f	LONGITUD (m)	COEFIC. km	VEL. m/s	ÁREA m ²	h _f + Σh _m (m)	α
1 - 2	0,1650	0,25	736488	0,0148	100	4,3	3,36	0,049	5,89E+00	216,2
1 - 8	0,1760	0,30	654664	0,0146	230	7,4	2,49	0,071	5,88E+00	189,8
2 - 3	0,0852	0,20	475137	0,0158	150	5,1	2,71	0,031	6,34E+00	874,0
2 - 7	0,0448	0,20	250190	0,0168	230	7,2	1,43	0,031	2,76E+00	1370,7
3 - 4	0,0451	0,20	251787	0,0168	100	4,3	1,44	0,031	1,34E+00	656,0
3 - 6	0,0000	0,20	171	0,3745	230	7,2	0,00	0,031	2,12E-05	22609,7
5 - 4	0,0099	0,15	73447	0,0205	230	6,8	0,56	0,018	6,08E-01	6238,6
6 - 5	0,0329	0,20	183413	0,0175	100	4,3	1,05	0,031	7,28E-01	673,6
7 - 6	0,1088	0,25	485827	0,0153	150	5,1	2,22	0,049	3,58E+00	302,4
8 - 7	0,1120	0,25	499927	0,0153	100	4,3	2,28	0,049	2,76E+00	220,3

4.2 Análisis de calidad de agua: concentración de un soluto (NaCl), en un nudo

Antes de analizar el comportamiento de la calidad del agua es necesario determinar el tipo de sustancia que como soluto es objeto de este proyecto y su relación con la calidad del agua en la red. Conocida la sustancia y su incidencia en la calidad del agua potable, se establecerán las teorías actuales de mezcla en las uniones (nudos correspondientes al modelo hidráulico), de una red de distribución de agua potable y se establecerán la bases para el desarrollo del experimento que busca una nueva aproximación para estimar las concentraciones de Cloro libre (con base en lo observado con NaCl), del agua de salida de una cruz (nudo).

4.2.1 Desinfección

La desinfección, es el proceso unitario final que se encarga de eliminar a los microorganismos patógenos que se encuentran en el agua, tales como; Bacterias, protozoarios, virus y tremátodos. Como lo define Jairo A. Romero R.⁶, El propósito primerio de la desinfección del agua es el impedir la diseminación de enfermedades hídricas.

Como lo explica María P. Villegas⁷, la destrucción de los microorganismos mediante la desinfección es función tanto del tiempo de exposición al agente letal (tiempo de contacto), como del desinfectante usado, como se muestra a continuación, para el Cloro:

$$t^2 = \frac{2}{k} \cdot \log_{10} \left(\frac{N_0}{N_t} \right)$$

Ecuación 10

Para un pH de 7, k toma los siguientes valores

k = 1,6 x 10⁻², residual de Cloro libre

k = 1,6 x 10⁻⁵, residual de Cloro combinado

⁶ Romero R., Jairo A. (2002). *Calidad del Agua*. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería.

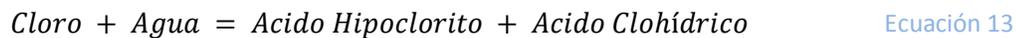
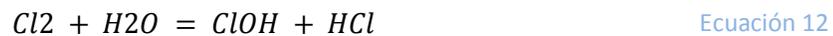
⁷ Villegas de B., María P. (2008). *Purificación de Aguas, Ejercicios*. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería.

La anterior ecuación, muestra finalmente que el proceso de desinfección con Cloro, es función básicamente de: el tiempo de contacto, la temperatura del agua, el pH del agua, el número de microorganismos, la dosis de Cloro y tipo de Cloro residual.

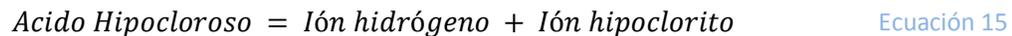
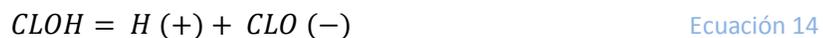
Aunque existen diferentes tipos de desinfectante, el Cloro es el desinfectante más usado, ya que es un agente oxidante fuerte, económico y fácil de conseguir. La característica más importante del Cloro es que a bajas concentraciones, y después de reaccionar con elementos presentes en el agua filtrada, deja un residual en solución dentro de la red de distribución de agua que actúa como un desinfectante en el tiempo, sin dejar sabor y siendo inocuo para el consumo humano. La porción de Cloro que queda en solución en el agua después de un determinado tiempo de contacto ya sea como ácido hipocloroso o ión hipoclorito se conoce como Cloro residual libre. El valor del Cloro residual libre exigido en Colombia debe estar en el rango de 0,3 y 2,0 mg/L. Por otra parte el Cloro consumido, corresponde a la cantidad Cloro utilizado en la reacción para eliminar los microorganismos en el agua; así se establece la siguiente igualdad;

$$\text{Cloro consumido} = \text{Dosis aplicada} - \text{Cloro Residual} \quad \text{Ecuación 11}$$

La reacción química que se presenta es:



A su vez:



Siendo el ácido hipoclorito el de mayor efectividad relativa en el proceso de desinfección.

El Cloro tiene la desventaja de ser muy inestable con la temperatura del agua que lo contiene, con la exposición a la luz y a la variación del pH entre otros⁸.

⁸ Por ello para el desarrollo del experimento se utilizara NaCl como soluto e inferir con los resultados la metodología que permita aplicar el cálculo de concentraciones obtenidas para NaCl al Cloro residual libre.

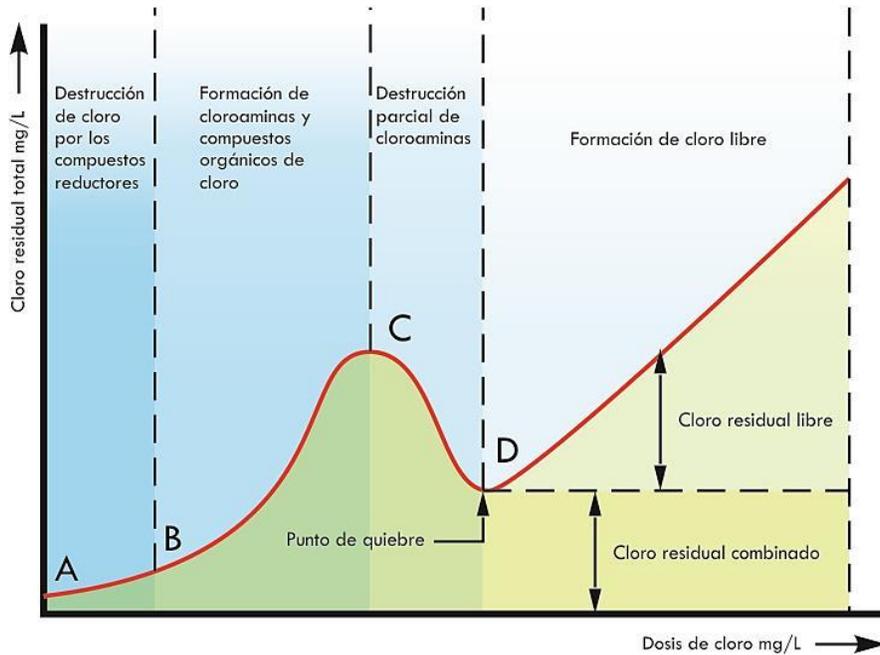


Figura 3. Curva de demanda de Cloro.⁹

4.2.2 Difusión

En la difusión, pequeñas partículas como moléculas, iones u otras, y gracias a la entropía del sistema, se mezclan de manera lenta y espontánea, a través de desplazamientos de zonas de alta concentración de esas partículas a zonas de baja concentración de las mismas.

4.3 Modelo de mezcla completa: método tradicional

El modelo de mezcla completa, es el más usado por los programas informáticos que permiten la realización de modelos de calidad de agua en redes de distribución. EPANET y otros programas comerciales usan este método para estimar el tipo de mezcla de un soluto en las uniones del modelo. El modelo supone una mezcla completa e instantánea en las uniones (nudos de la red), la facilidad de la fórmula permite un cálculo rápido y aproximado de fenómeno de mezcla, siendo de fácil incorporación a un programa informático.

Dado que el modelo se basa en la mezcla completa e instantánea del soluto a través de los flujos de agua que discurren por la unión, este modelo prevé la mayor mezcla posible que puede ocurrir dentro de la misma. Sin embargo la anterior premisa deja de lado las interacciones físicas de los flujos que discurren: diferencia de caudales, presiones y derivadas de las dos anteriores las fuerzas de impulso, generando datos antagónicos entre el modelo informático y los datos obtenidos en

⁹ Adaptado por el autor de: Romero R., Jairo A. (2002). *Calidad del Agua*. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería.

campo en modelos físicos o en la red misma. Un balance de masa del soluto en la unión se puede evaluar con la siguiente ecuación, para un solo caudal de salida.

$$C_{out} = \frac{1}{Q_{out}} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \cdot C_i$$

Ecuación 16

De manera más general y tal como lo describe el modelo que usa WaterCad¹⁰, la concentración resultante de una mezcla total en un nudo se puede calcular de la siguiente manera:

$$C_{out,j} = \frac{1}{\sum_{i \in out,j} Q_i} \cdot \sum_{i \in in,j}^n Q_i \cdot C_{i,ni} + U_j$$

Ecuación 17

dónde:

- $C_{out,j}$: Concentración saliente del accesorio en el nudo j (M/L³)
- Out_j : Grupo de tuberías que salen del nudo j
- In_j : Grupo de tuberías que entran al nudo j
- Q_i : Caudal que entra al nudo por la tubería i (L³/T)
- $C_{i,ni}$: Concentración que entra al nudo por la tubería i (M/L³)
- U_j : Suministro externo de concentración al nudo j (M/T)

4.4 Modelo de mezcla parcial: concepción moderna.

Resultado de diferentes investigaciones, modelos físicos y modelos realizados a través de la Computational Fluid Dynamics (CFD), se corroboró que el modelo de mezcla completa no era el más acertado para predecir la concentración de un soluto a la salida de una unión. Con las observaciones efectuadas y los datos obtenidos experimentalmente, se desarrolló el modelo de mezcla parcial.

¹⁰ Bentley Institute Press. (2007), primera edición. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Exton Pennsylvania. Bentley Systems Inc.

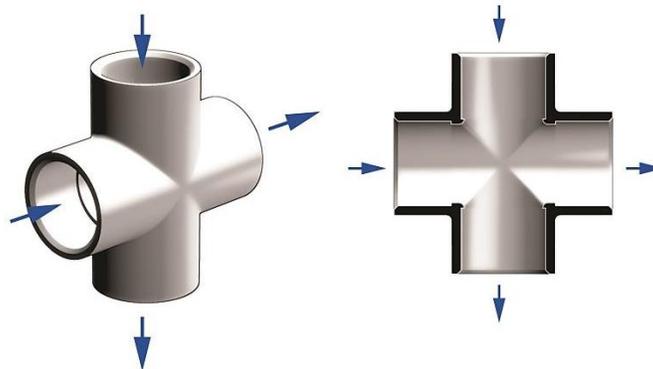


Figura 4. Características internas de la tee de PVC de 1” usada como unión en el experimento¹¹.

Este modelo complementa el modelo tradicional de mezcla completa, proporcionando un acercamiento real al fenómeno de mezcla, tomando en cuenta las reacciones físicas (velocidad del agua, impulso) y químicas (variación de la concentración), del flujo que discurre por cada tubería de ingreso a la unión y su interacción con las paredes y geometría del accesorio que los contiene y une.

En el modelo de mezcla parcial, el impulso desigual de los flujos que discurren a través de la unión que en conjunto con otras variables hidráulicas en los modelos hacen que a la salida de la misma exista una diferencia en los caudales, sin mantener una relación de proporción o igualdad con los caudales de entrada (salvo en algunos casos), tal como es de esperarse debido a resultado del modelo hidráulico.

Dada esta independencia de los caudales de salida, el impulso de flujo por alguna de las entradas (fuerza resultante del tubo de ingreso 1), podrá ser tal que supere al impulso de la otra (fuerza resultante del tubo de ingreso 2), la sumatoria final de fuerzas en la unión hará que parte del flujo del líquido que ingresa a la unión por el extremo 1, desplace espacialmente (dentro de punto de convergencia de los flujos en la unión), al flujo del líquido que ingresa a la unión por el extremo 2, modificando la concentración del soluto que ingresa con el líquido a través del extremo 2 y que sale a través del extremo 3 de la unión

¹¹ Adaptado por el autor de: Ho. Clifford. (2008). *Solute Mixing Models for Water-Distribution Pipe Networks*. Recuperado el de octubre de 2013, de ASCE: <http://gsgc.gzhu.edu.cn/gpsgd/UploadFile/200942623229730.pdf>

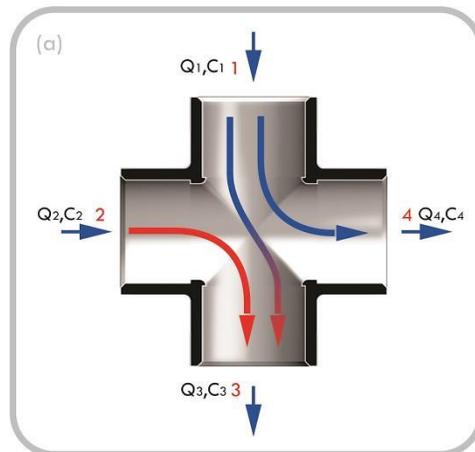


Figura 5. Mayor impulso en la dirección vertical¹²

De igual manera puede ocurrir si el impulso es mayor en el líquido que fluye e ingresa por el extremo 2 de la unión, que el impulso el líquido que fluye e ingresa por el extremo 1 de la unión como se observa a continuación.

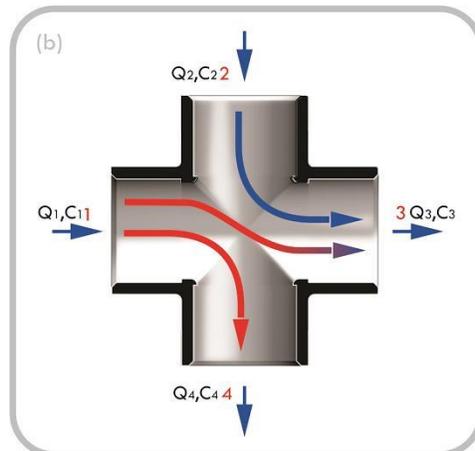


Figura 6. Mayor impulso en la dirección horizontal¹³

Se puede presentar también el caso en el cual no exista mezcla alguna; esto se da si:

¹² Adaptado por el autor de: Ho. Clifford. (2008). *Solute Mixing Models for Water-Distribution Pipe Networks*. Recuperado el de octubre de 2013, de ASCE: <http://gsgc.gzhu.edu.cn/gpsgd/UploadFile/200942623229730.pdf>

¹³ Adaptado por el autor de: Ho. Clifford. (2008). *Solute Mixing Models for Water-Distribution Pipe Networks*. Recuperado el de octubre de 2013, de ASCE: <http://gsgc.gzhu.edu.cn/gpsgd/UploadFile/200942623229730.pdf>

1. Si los caudales que ingresan a la unión son iguales, y poseen el mismo impulso
2. Si el caudal que fluye por la tubería de entrada y salida colindantes son iguales.

Bajo estas circunstancias los flujos chocan, la sumatoria de las fuerzas derivadas del impulso se anulan y por tanto el flujo se bifurca completamente y no existirá mezcla.

Para la aplicación del modelo de mezcla parcial se realizan los siguientes pasos:

1. Calcular la tasa de cambio del impulso del fluido tuberías que ingresan a la unión, y en las que salen de la unión, es decir, entradas y salidas situados a 180° entre ellas.

$$\vec{F} \rightarrow \left(\frac{\rho Q_i^2}{A_i} \right)$$

Ecuación 18

2. Asignar el número 1, al flujo del líquido que discurre la entrada en la unión y que tiene mayor impulso, asignar el número 3, a la salida de la unión enfrentada al ingreso en 1*.
3. Asignar el número 2, al flujo del líquido que discurre la entrada en la unión y que tiene menor impulso, asignar el número 4, a la salida de la unión enfrentada al ingreso en 2*.

* Ver ilustraciones siguientes.

Dado que el cambio de temperatura en el agua que fluye por las redes de distribución de agua durante un día potable varía muy poco (no más de 10°C), su densidad puede tomarse como constante y bajo estas condiciones el criterio de impulso es el siguiente:

$$\frac{Q_1^2}{A_1} + \frac{Q_3^2}{A_3} > \frac{Q_2^2}{A_2} + \frac{Q_4^2}{A_4}$$

Ecuación 19

- ✓ La anterior ecuación está fundamentada bajo la consideración que las conexiones en la unión contengan tuberías con el mismo diámetro interno, siendo sólo aplicable para estos casos. Para uniones con diferentes diámetros se debe hallar otra ecuación.

Con las conexiones identificadas, es posible establecer las diferentes concentraciones de salida, con base en las siguientes suposiciones:

1. El modelo hidráulico suministra el valor de los caudales que entran o salen de la unión (no se toman en cuenta las demandas), Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4 .
2. Se conocen las concentraciones del soluto en cada una de las entradas del fluido a la unión. C_1 y C_2 .
3. El soluto transportado por el fluido y que ingresa a la unión proveniente de las tuberías, está totalmente disuelto y perfectamente mezclado en él.

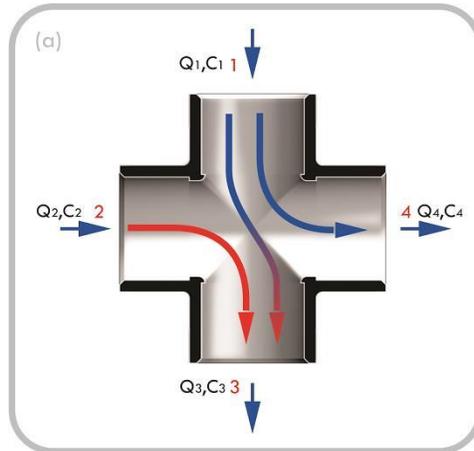


Figura 7. Mayor impulso en la dirección vertical¹⁴

Analizando la figura anterior es evidente que el caudal de agua que sale por el extremo 4 de la unión ($Q_{1 \rightarrow 4} = Q_4$), proviene de 1, y como se aprecia, este caudal no tiene contacto con el que ingresa por 2, de tal manera que las características químicas de 1 se conservan y son las que están contenidas en 4 ($C_1 = C_4$), matemáticamente esto se puede representar como sigue:

$$Q_4 C_4 = Q_{1 \rightarrow 4} C_1 = Q_4 C_1 \quad \text{Ecuación 20}$$

Siendo la anterior expresión el balance de masa del soluto de que sale de la tubería 4.

La concentración del soluto que sale por el extremo 3 hacia la tubería, se halla realizando un balance de masa del soluto a través de la unión.

$$Q_1 \cdot C_1 + Q_2 \cdot C_2 = Q_3 \cdot C_3 + Q_4 \cdot C_4 \quad \text{Ecuación 21}$$

Como ($C_1 = C_4$),

$$Q_1 \cdot C_1 + Q_2 \cdot C_2 = Q_3 \cdot C_3 + Q_4 \cdot C_1 \quad \text{Ecuación 22}$$

Despejando C_3

¹⁴ Adaptado por el autor de: Ho. Clifford. (2008). *Solute Mixing Models for Water-Distribution Pipe Networks*. Recuperado el de octubre de 2013, de ASCE: <http://gsgc.gzhu.edu.cn/gpsgd/UploadFile/200942623229730.pdf>

$$C_3 = \frac{1}{Q_3} \cdot ((Q_1 - Q_4) \cdot C_1 + Q_2 \cdot C_2) \quad \text{Ecuación 23}$$

La ecuación anterior determina que conociendo los caudales de entrada y salida, y la concentración del soluto en una entrada y una salida en la unión en cruz, se puede determinar la concentración en la salida faltante. El valor de los caudales se evalúa previamente a través de métodos como el del gradiente. La forma de la ecuación permite ser implantada fácilmente en el algoritmo de un programa computacional para la modelación de redes de tuberías.

Existe otra manera para determinar la concentración de un soluto que sale por el extremo 3 hacia la tubería; Romero-Gómez¹⁵, propusieron una metodología basada en la razón que existe entre los caudales de entrada Q_1 y Q_2 , como resultado de sus experimentos. La metodología es como se presenta a continuación:

Primero se definen dos variables x y y , así:

$$x = \frac{Q_1}{Q_2} \quad y = \frac{Q_4}{Q_3} \quad \text{Ecuación 24}$$

Aplicando la conservación de masa de agua que fluye a través de la unión, se tienen;

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad \text{Ecuación 25}$$

Combinando las anteriores ecuaciones se tienen las siguientes razones entre caudales y las variables x y y

$$\frac{Q_2}{Q_3} = \frac{y + 1}{x + 1} \quad \text{Ecuación 26}$$

De igual manera se tiene

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{y + 1}{x^{-1} + 1} \quad \text{Ecuación 27}$$

Combinando las dos anteriores ecuaciones y combinándolas con la relación de concentraciones se tiene;

$$C_3 = \left(\frac{y + 1}{x + 1} \right) \cdot C_2 + \left(\frac{x - y}{x + 1} \right) \cdot C_1 \quad \text{Ecuación 28}$$

¹⁵ Ho. Clifford. (2008). *Solute Mixing Models for Water-Distribution Pipe Networks*. Recuperado el de octubre de 2013, de ASCE: <http://gsgc.gzhu.edu.cn/gpsgd/UploadFile/200942623229730.pdf>

5 Observaciones sobre el experimento

Para realizar el experimento y poder cotejar los resultados obtenidos en el mismo vs el marco teórico descrito en el numeral anterior, es necesario conocer la procedencia de las ecuaciones y parámetros descritos. Conocer qué bases físicas y químicas tiene lo anterior es fundamental para el desarrollo del experimento y la comparación de los resultados de mismo.

Se propone primero determinar las ecuaciones anteriormente halladas; posteriormente se plantea hacer un modelo de la instalación del experimento con EPANET e interpretar sus resultados hidráulicos con la teoría aquí expuesta.

5.1 ¿Por qué lo lógico es suponer predominio de mezclas parciales y no totales en una unión?

Tomando en consideración que el elemento de estudio corresponde a una cruz cuyos diámetros de entrada y salida son iguales, y que además su configuración geométrica interna es simétrica (en teoría), se pueden identificar cuatro (4) posibles configuraciones de flujo de la solución dentro de la unión.

De estas configuraciones, el caso número 4 es el más común en los nudos de sistemas de distribución de agua potable, siendo además este caso el que afecta de manera significativa la distribución de las concentraciones de un soluto en un red de tuberías.

Para el caso del Cloro Residual, aunque este se degrada a medida que fluye mezclado con el agua a través de la red de tuberías de distribución, por las reacciones con la pared de las mismas y de los accesorios que la conforman, la distribución de la concentración del mismo en los nudos genera un mayor impacto en el modelo de simulación de calidad de agua distribuida en la red.

5.1.1 Caudales confluyentes en una cruz.

5.1.1.1 Primer caso

Una primera configuración corresponde a una única entrada de flujo en la cruz y con tres salidas, tal como aparece en la figura que sigue.

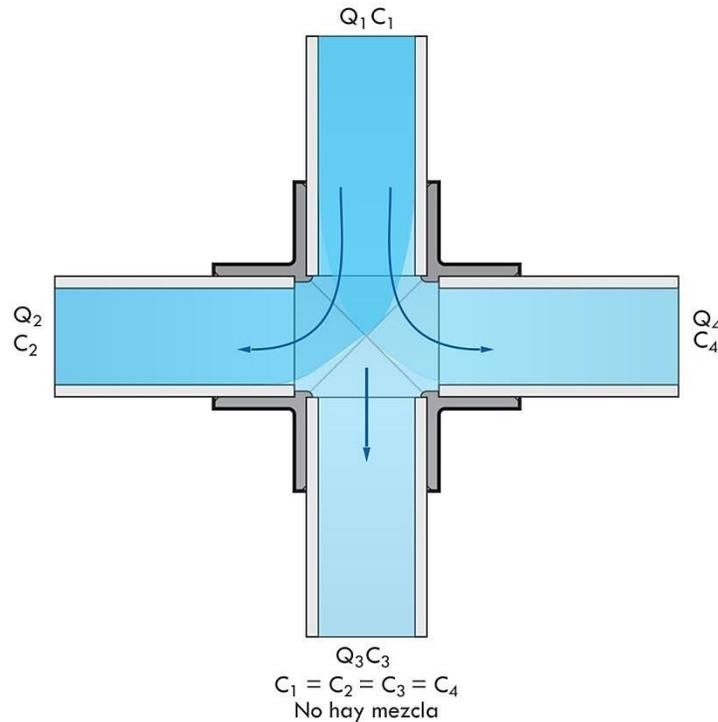


Figura 8. Única entrada de flujo con su concentración a la cruz.

En esta configuración se observa que el caudal de entrada, con su respectiva concentración, se distribuye en las tres salidas, manteniéndose en cada una de ellas la misma concentración.

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$$

Ecuación 29

5.1.1.2 Segundo caso

Una segunda configuración corresponde al ingreso de dos caudales por los extremos opuestos de la cruz, los cuales se encuentran en el centro de esta y se distribuyen por las salidas que quedan perpendiculares a la dirección del flujo de ingreso del soluto. En este caso si los caudales son iguales, la mitad del caudal entrante por cada uno de los ingresos se desplazará hacia cada una de las salidas, e igualmente ocurrirá con las respectivas concentraciones, dando como resultado una mezcla total.

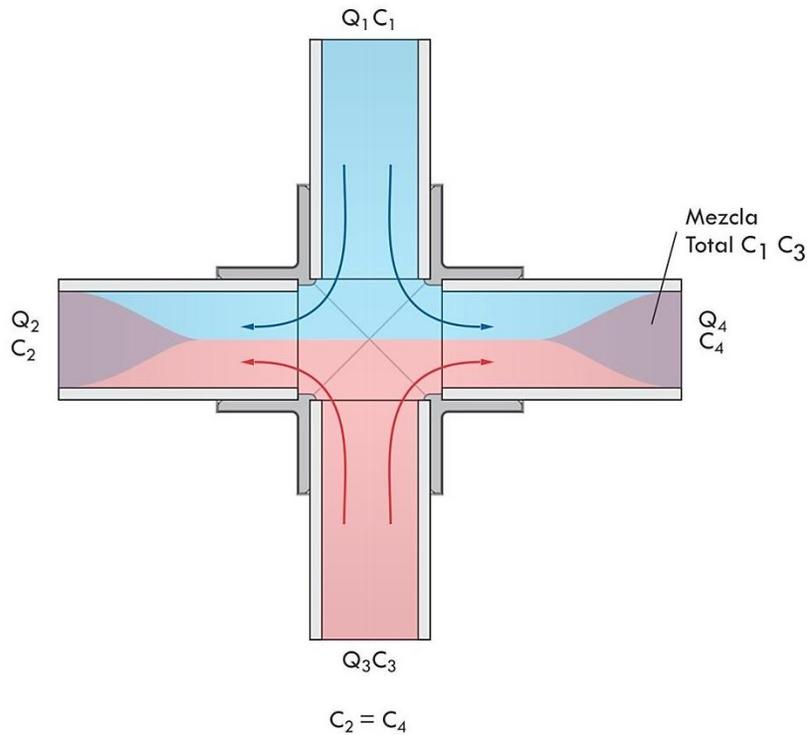


Figura 9. Flujo por entradas encontradas hacia el centro de la cruz.

En una variación de esta configuración, donde un caudal de entrada es mayor que el otro, los caudales de salida estarán compuestos por una proporción de los caudales de entrada, que corresponde a la suma de las mitades de los caudales de entrada.

5.1.1.3 Tercer caso

Es el caso en el cual tres caudales con sus correspondientes concentraciones confluyen al centro de la cruz, saliendo de esta un caudal total que corresponde a la suma de los mencionados y con una concentración correspondiente a la combinación de las iniciales. En este caso la mezcla a la salida es total, tal como se observa en la siguiente ilustración.

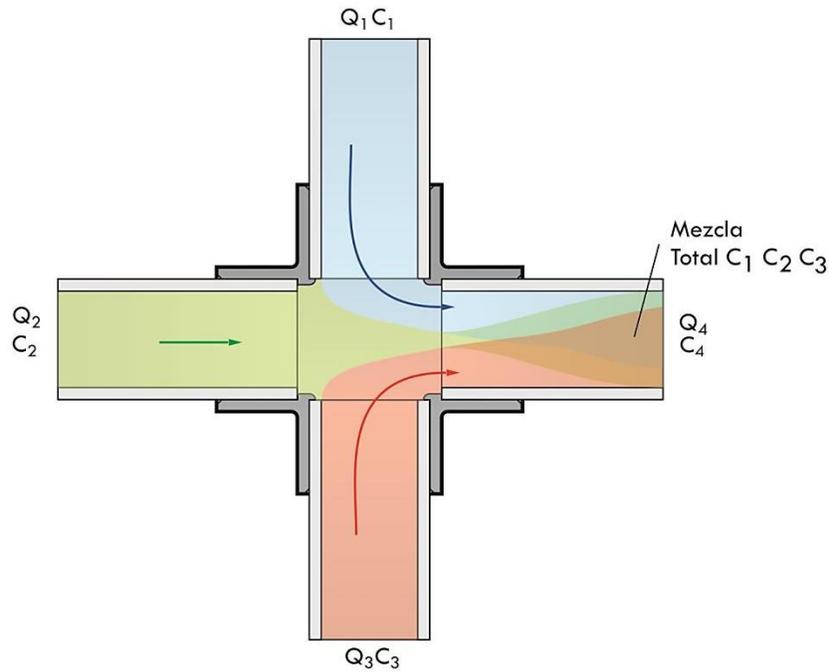


Figura 10. Tres caudales que confluyen en el centro de la cruz.

5.1.1.4 Cuarto caso

Una cuarta configuración consiste en dos caudales de entrada, pero esta vez ingresando por ramales adyacentes.

5.1.1.4.1 Tipo a.

Si los caudales de entrada son iguales, la colisión que se produce en el centro de la cruz provocará que se separen hacia la salida más próxima, sin existir mezcla, manteniendo (en teoría), en cada salida la concentración original de la entrada adyacente.

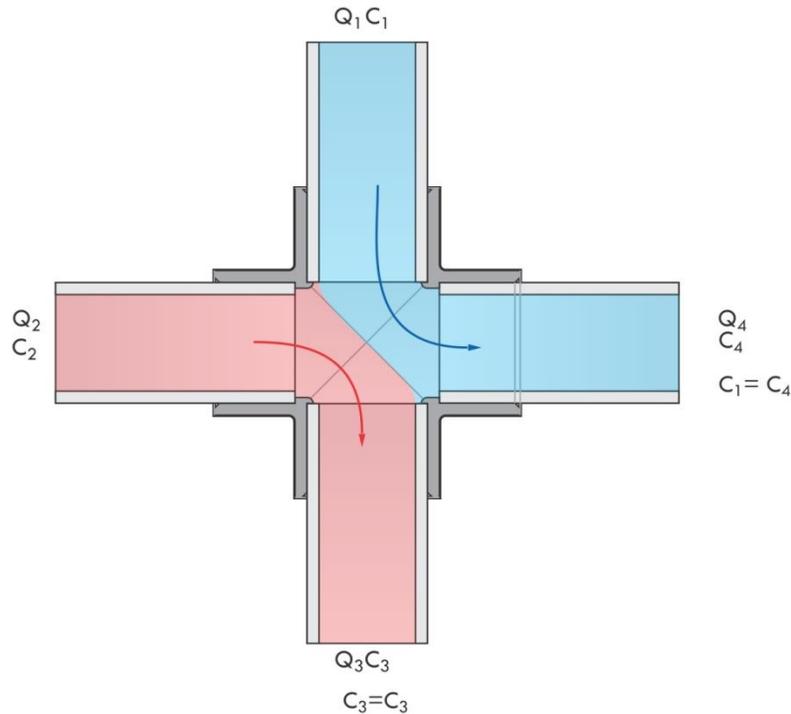


Figura 11. Dos caudales de entrada con diferentes concentraciones confluyen en el centro de la cruz sin que exista mezcla

5.1.1.4.2 Tipo b.

Una variación de esta configuración muestra igualmente dos entradas adyacentes pero esta vez transportando caudales diferentes. En teoría en este caso el caudal mayor tiende a empujar al caudal menor hacia la salida opuesta, manteniendo la concentración original del caudal mayor en la salida adyacente y permitiendo una mezcla parcial entre los dos caudales, y por consiguiente entre las dos configuraciones, en la salida opuesta a la entrada con el mayor caudal.

Este es el caso explicado por Ho, en el modelo de mezcla parcial.

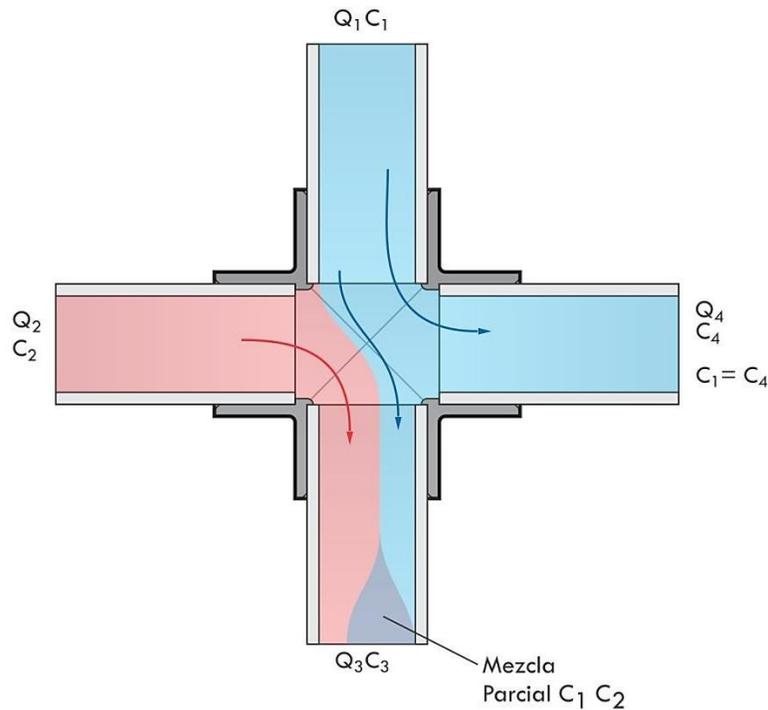


Figura 12. Mezcla parcial dentro de la cruz, cuarto caso.

5.1.2 Mezcla de soluciones acuosas

La mezcla de soluciones acuosas es un proceso que ocurre cotidianamente dentro de las tuberías de una red de distribución de agua potable. La mezcla de estas soluciones se puede ocurrir con o sin reacción química de los solutos. Para el caso del experimento que se desarrolla en este trabajo, se considera que al ser las soluciones del mismo soluto no existirá una reacción química dentro de la mezcla.

5.1.2.1 Mezcla de soluciones sin reacción química

La mezcla de dos o más soluciones acuosas sin que ocurra una reacción química dentro de ella, se presenta cuando el soluto principal (objeto de estudio), es el mismo o cuando solutos que acompañan a los principales son diferentes pero inertes entre sí y el soluto principal.

Para hallar la concentración final resultado de la mezcla de dos o más soluciones con el mismo soluto, se toma como base el principio de conservación de la materia. Las cantidades del soluto común que se mezcla se deben conservar y la cantidad total de soluto en la mezcla final debe ser igual a la suma de los solutos que se mezclan.

Dado que la solución tiene como base además del mismo soluto, el mismo solvente (agua), se considera que los volúmenes de las soluciones que se mezclan se pueden sumar. De allí se tiene para el tercer caso:

$$C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + C_3 \cdot V_3 = C_4 \cdot V_4 \quad \text{Ecuación 30}$$

Dividiendo el volumen en la base de tiempo unitaria, estos pasan a ser caudales, reescribiendo se tiene que para el tercer caso:

$$C_1 \cdot \frac{V_1}{t} + C_2 \cdot \frac{V_2}{t} + C_3 \cdot \frac{V_3}{t} = C_4 \cdot \frac{V_4}{t} \quad \text{Ecuación 31}$$

Despejando la concentración en C_4 se tiene:

$$\frac{t}{V_4} \left[C_1 \cdot \frac{V_1}{t} + C_2 \cdot \frac{V_2}{t} + C_3 \cdot \frac{V_3}{t} \right] = C_4 \quad \text{Ecuación 32}$$

Para el caso cuatro se tiene:

$$C_1 \cdot \frac{V_1}{t} + C_2 \cdot \frac{V_2}{t} = C_3 \cdot \frac{V_3}{t} + C_4 \cdot \frac{V_4}{t} \quad \text{Ecuación 33}$$

Si C_1 es igual a C_4 , entonces:

$$C_1 \cdot \frac{V_1}{t} + C_2 \cdot \frac{V_2}{t} = C_3 \cdot \frac{V_3}{t} + C_1 \cdot \frac{V_4}{t} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$C_1 \cdot \frac{V_1}{t} - C_1 \cdot \frac{V_4}{t} + C_2 \cdot \frac{V_2}{t} = C_3 \cdot \frac{V_3}{t} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$C_1 \cdot \frac{V_1}{t} - C_1 \cdot \frac{V_4}{t} + C_2 \cdot \frac{V_2}{t} = C_3 \cdot \frac{V_3}{t} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$\frac{t}{V_3} \left[C_1 \cdot \frac{V_1}{t} - C_1 \cdot \frac{V_4}{t} + C_2 \cdot \frac{V_2}{t} \right] = C_3 \quad \text{Ecuación 37}$$

Esta última ecuación, corresponde en términos generales a la misma utilizada por Ho y descrita en el marco teórico.

Es evidente además, que para este caso la concentración resultante C_3 , debe corresponder a un valor localizado entre las concentraciones C_1 y C_2 (recordar que en teoría $C_1 = C_4$), así:

$$C_1 < C_3 < C_2 \quad \text{Ecuación 38}$$

Si C_2 es mayor a C_1 , o

$$C_2 < C_3 < C_1 \quad \text{Ecuación 39}$$

Si C_1 es mayor a C_2

5.1.2.2 Fuerza (impulso), de fluidos que discurren en la cruz

El impulso o de la cantidad de movimiento es una de las ecuaciones fundamentales en la resolución de problemas de mecánica de fluidos.

Tomando como base la segunda Ley de Newton, la fuerza es el producto de la masa por la aceleración. Dado que la aceleración es la variación de la velocidad con respecto al tiempo se tiene que:

$$\bar{F} = m \frac{d\bar{v}}{dt} \quad \text{Ecuación 40}$$

Ahora, si una partícula de fluido de masa conocida y constante m es sometida a una fuerza F durante un intervalo de tiempo ($t_2 - t_1$), se puede multiplicar los dos miembros de la ecuación por dt e integrando, se tiene:

$$\int_{t_1}^{t_2} \bar{F} dt = m (v_2 - v_1) \quad \text{Ecuación 41}$$

donde:

$\int_{t_1}^{t_2} \bar{F} dt$: Impulso de la fuerza \bar{F} que en general variará con el tiempo en el intervalo $t_2 - t_1$

$m\bar{v}$: Cantidad de movimiento de la partícula de fluido

La ecuación anterior es el teorema del impulso aplicado a una partícula de fluido.

La anterior ecuación puede escribirse de la siguiente manera, dado que la masa m de la partícula del fluido, es igual a la densidad del fluido (a la temperatura que discurre), por un volumen (volumen de control), la ecuación anterior se puede escribir así:

$$F \cdot \Delta t = \rho \cdot V \cdot \Delta v \quad \text{Ecuación 42}$$

Despejando la fuerza se tiene:

$$F = \frac{1}{\Delta t} \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta v \quad \text{Ecuación 43}$$

Tomando en cuenta que caudal es volumen sobre tiempo la anterior ecuación cambia a:

$$F = \rho \cdot Q \cdot \Delta v \quad \text{Ecuación 44}$$

Por otra parte la velocidad es igual al caudal dividido el área, finalmente la ecuación se convierte en:

$$F = \rho \cdot \frac{Q^2}{A} \quad \text{Ecuación 45}$$

Esta última ecuación, corresponde a sugerida por Ho, para la aplicación del modelo de mezcla parcial.

5.2 Estrategia metodológica para acertar en la solución del objetivo del experimento¹⁶

5.2.1 Conservación de la masa en el nudo (cruz)

Del principio de la conservación de la masa en la cruz en cada instante de tiempo, se define la premisa de que la sumatoria de la masa de NaCl en las tuberías de entrada es igual a la sumatoria de la masa de NaCl en las tuberías de salida, así:

$$m_1 + m_2 = m_3 + m_4 \quad \text{Ecuación 46}$$

A lo anterior se suma que, bajo el mismo principio, la sumatoria de los caudales de entrada es igual a la sumatoria de los caudales de salida:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad \text{Ecuación 47}$$

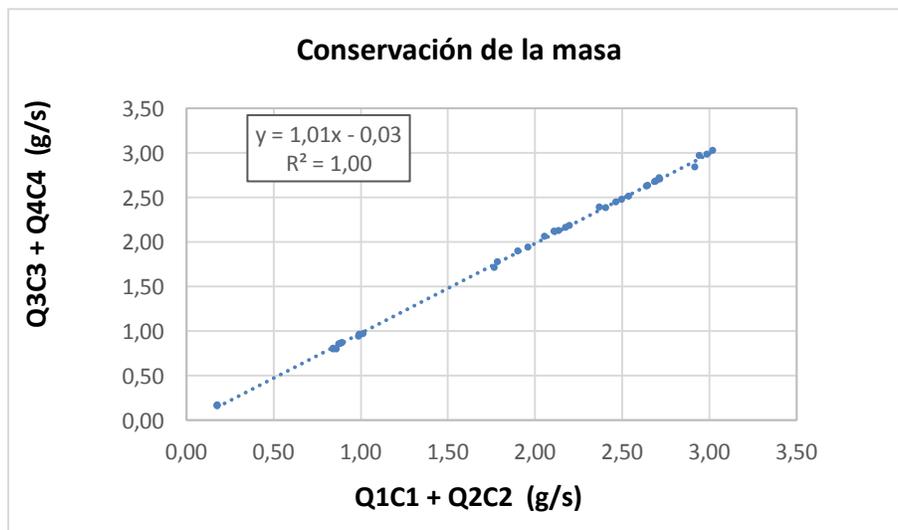
¹⁶ Cambio de condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultado. Así mismo, el experimento permite aumentar el conocimiento acerca del sistema. Gutiérrez, P. H. & De la Vara. S.R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Bogotá. Mc Graw Hill.

Si se tiene que el producto del volumen por la concentración de un soluto en él, es igual a la masa este último, al evaluar dicha situación en una unidad de tiempo, se tiene que el producto del caudal por la concentración es igual a la masa sobre dicha unidad de tiempo, y esto se incluye en la ecuación de balance de la masa en el nudo, se tiene:

$$Q_1C_1 + Q_2C_2 = Q_3C_3 + Q_4C_4$$

Ecuación 48

Lo anterior se cumple siempre y cuando dentro de las pruebas realizadas se dé cumplimiento al principio inicialmente enunciado, el de la conservación de la masa, condición que se pudo comprobar al graficar la sumatoria de los caudales de entrada por sus respectivas concentraciones, contra la sumatoria de los caudales de salida por sus respectivas concentraciones, es decir, masa de entrada contra masa de salida, obteniendo los resultados mostrados en la gráfica siguiente



Gráfica 2. Conservación de la masa

5.2.2 Variables, factores y niveles

Las variables de respuesta que permiten conocer el efecto resultante de la aplicación de cada análisis que de la prueba que se hace sobre el experimento, de manera directa es la medida en la conductividad del agua a la salida en los tanques de recolección T3 y T4, de manera indirecta la relación que existe entre la concentración del soluto en el agua recolectada C_3 y C_4 , y la conductividad medida.

Los factores controlables en experimento corresponden al conocimiento y ajuste preciso de los caudales de entrada y salida al nudo, así como las concentraciones del soluto en la solución que discurrirán a través del nudo con el caudal que ingresa al mismo.

Los factores no controlables o de ruido son las características internas de la cruz utilizada, como la rugosidad del material, geometría interna y calidad y tipo de la conexión con las tuberías entrantes o salientes. Otros factores no controlables son las incertidumbres del proceso derivados de variaciones aleatorias en la medida de las variables confluyentes en el experimento o en la ejecución del mismo.

Los factores de estudio corresponden a la relación que existe entre los caudales de entrada Q_1 y Q_2 , y sus concentraciones con los caudales de salida Q_3 y Q_4 , sus las concentraciones.

5.2.3 Metodología propuesta “Estrategia y consideraciones”

5.2.3.1 Determinar la función general objetivo

Dado que lo anterior se cumple se plantea una relación entre los caudales de entrada y de salida, se plantea a la siguiente función:

$$C_3, C_4 = f(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, C_1, C_2)$$

Ecuación 49

Dónde: Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, C_1 y C_2 , son conocidas

5.2.3.2 Determinar las restricciones iniciales para el experimento planeado

Se determinan las siguientes restricciones para el experimento planteado. Se identifican para la solución cuantitativa de este experimento:

- Siempre $Q_1 \geq Q_2, Q_3$ y Q_4 .
- Siempre $Q_3 \geq Q_4$.
- Siempre $C_1 > C_2, C_3$ y C_4 .
- Siempre $C_3 \leq C_4$.
- Siempre $C_3 > C_2$.

Para cada relación entre las variables, identifique todas las restricciones posibles.

5.2.3.3 Proponer relaciones entre las variables¹⁷

Para este experimento se propone la siguiente relación en consideración a las restricciones iniciales:

$$\frac{Q_1 C_1}{Q_2 C_2} \rightarrow \frac{Q_3 C_3}{Q_4 C_4}$$

Ecuación 50

¹⁷ Se deben proponer tantas relaciones como posibilidades de cambio existan en las variables de salida.

5.2.3.4 Determinar la ecuación de relación

Hallando la relación para C_3

Si

$$\frac{Q_3 C_3}{Q_4 C_4} = y ; f\left(\frac{Q_1 C_1}{Q_2 C_2}\right) = f(x) \quad \text{Ecuación 51}$$

Entonces

$$y = f(x) \quad \text{Ecuación 52}$$

$$Q_3 C_3 = Q_4 C_4 \cdot f(x) \quad \text{Ecuación 53}$$

Partiendo de la ecuación de mezcla y conservación de masa se despeja $Q_3 C_3$:

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 - Q_4 C_4 = Q_3 C_3 \quad \text{Ecuación 54}$$

Igualando las dos anteriores ecuaciones:

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 - Q_4 C_4 = Q_4 C_4 \cdot f(x) \quad \text{Ecuación 55}$$

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 = Q_4 C_4 \cdot f(x) + Q_4 C_4 \quad \text{Ecuación 56}$$

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 = Q_4 C_4 \cdot [f(x) + 1] \quad \text{Ecuación 57}$$

Despejando C_4 se tiene:

$$\frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2}{Q_4 \cdot [f(x) + 1]} = C_4 \quad \text{Ecuación 58}$$

Con lo que se obtiene la ecuación explícita para el cálculo de C_4 a partir de las variables conocidas de entrada, esto es caudales y concentraciones, y caudal de salida sobre la tubería requerida.

De manera análoga se desarrolla para la concentración C_3 obteniendo:

$$C_3 = \frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2}{Q_3 \left[1 + \frac{1}{f(x)} \right]}$$

Ecuación 59

5.2.4 Diagrama de flujo de la estrategia planteada

La estrategia para hallar el valor de las concentraciones de manera general se muestra a continuación:

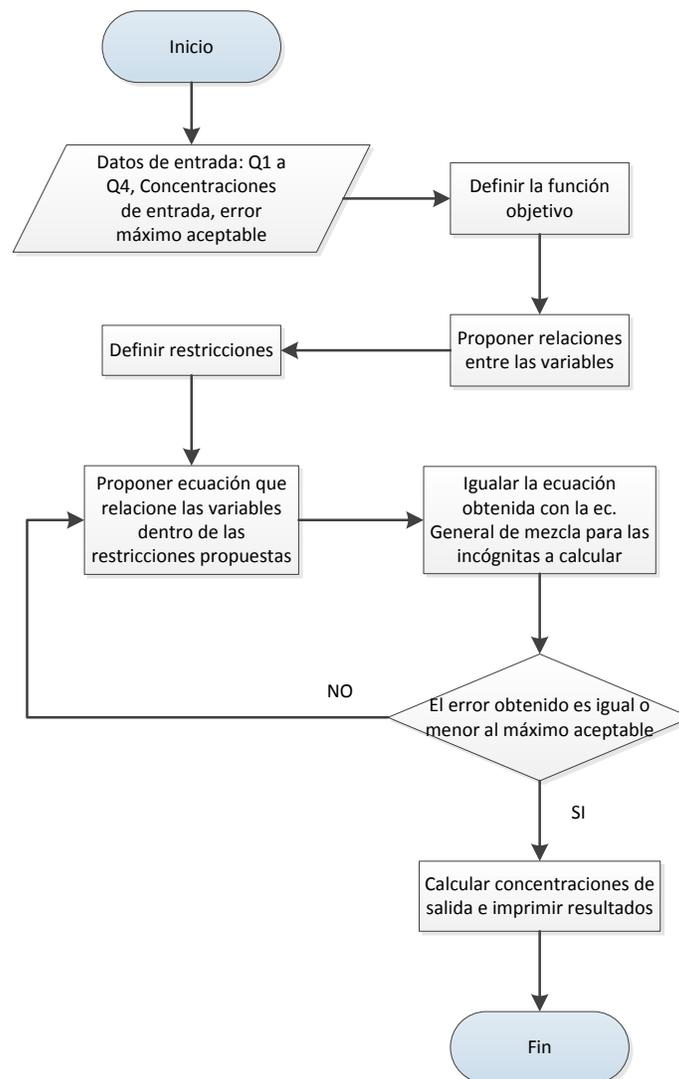


Figura 13. Diagrama de flujo de la estrategia planteada

6 Modelo físico y digital

El modelo físico del experimento se diseñó con el objetivo de generar diferentes tipos de caudales en las entradas y salidas de la cruz, y conocer en cada caso el caudal transportado. Se permitió una variación máxima del nivel del agua en los tanques de suministro, del 5%, lo que garantiza un caudal estable y uniforme. La imagen del modelo físico se muestra a continuación.

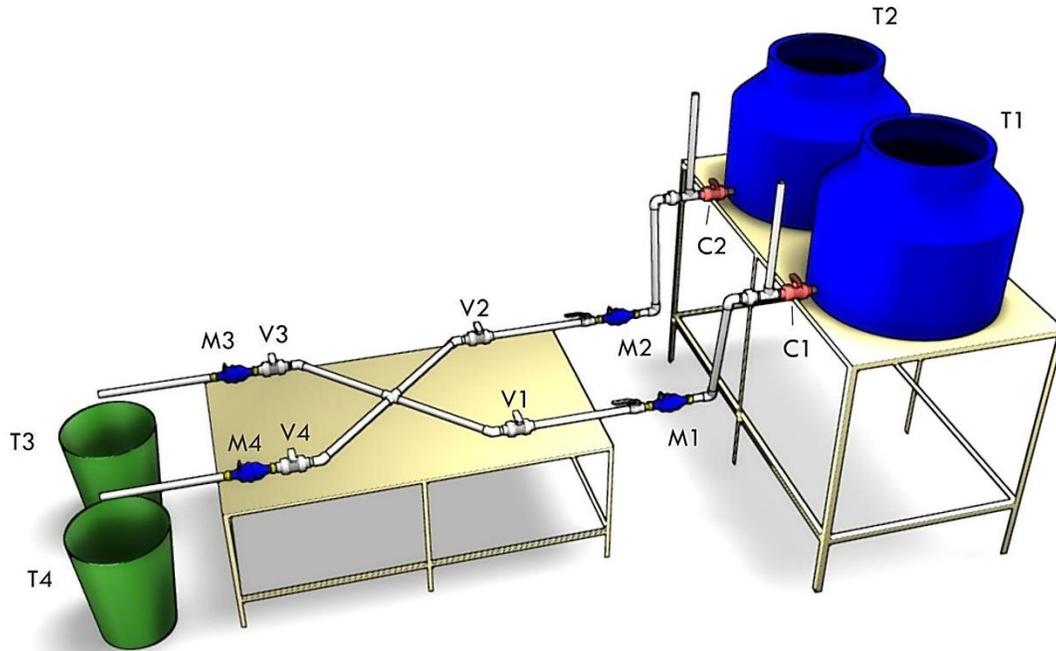


Figura 14. Modelo físico ensamblado.

6.1 Partes del modelo físico

El modelo físico está constituido por:

- Sistema de alimentación; constituido por una manguera conectada a una llave de agua potable que proviene de la red de Acueducto de Bogotá.
- Tanques de suministro; uno con agua con una solución acuosa de agua y sal de comedor, y otro con agua potable, ambos tipo botella marca PAVCO con una capacidad individual de 300 L (T1 y T2).
- Sistema de tuberías y válvulas; compuesto por tuberías de PVC (RDE 21) marca PAVCO de 1 pulgada de diámetro nominal cortadas a 0,5m de longitud y refrentadas y refileadas en sus extremos, válvulas en PVC tipo bola de $\frac{1}{4}$ de vuelta con unión universal marca ControlAgua, dos de control (C1 y C2), y cuatro de regulación de caudal (V1, V2, V3 y V4), y una cruz comercial en PVC de 1 pulgada.
- Sistema de recolección; compuesto por dos tanques de 60L cada uno. (T3 y T4)

- e. Sistema de control de caudal; constituido por un sistema de cuatro medidores volumétricos de 1 pulgada (M1, M2, M3 y M4).
- f. Sistema de instrumentación: compuesto por un medidor de temperatura (PT 100), con un rango de 0 a 50°C y un medidor de Conductividad de 0 a 20 mS.
- g. Sistema de cámaras de video: compuesto por cuatro cámaras de video WEB para grabar el volumen de agua acumulado en tiempo real durante la prueba.



Fotografía 1. Modelo físico del experimento.

6.2 Modelo digital en EPANET

Diseñado el modelo físico del experimento, este se digitalizó en el software de modelación hidráulica de tuberías a presión EPANET, versión 2.0.12 vE, traducido por la Universidad Politécnica de Valencia.

El propósito del desarrollo del modelo físico en EPANET, tiene como objeto predecir el comportamiento hidráulico del modelo al variar los caudales en cada una de las entradas y salidas de la cruz y tener un punto de referencia con relación a los posibles resultados que se esperarían del modelo físico.



Figura 15. Traductores de la versión utilizada de EpaNet a español

Se ajustó el modelo de manera que fuera posible simular los doce (12) escenarios planteados. Dado que algunos de los escenarios planteaban pérdidas de energía derivadas del cierre de una o dos válvulas y su consecuente cambio de caudal en la línea controlada, se planteó hacer esto con el modelo en EPANET, encontrando que al utilizar una válvula reguladora por estrangulación debida al cambio del coeficiente de la válvula, esta no generaba ningún cambio en la pérdida por fricción en la misma. Debido a lo anterior fue necesario hacer la correspondiente pérdida sobre la tubería a controlar, incrementando en ella el coeficiente de pérdidas menores que la componen.

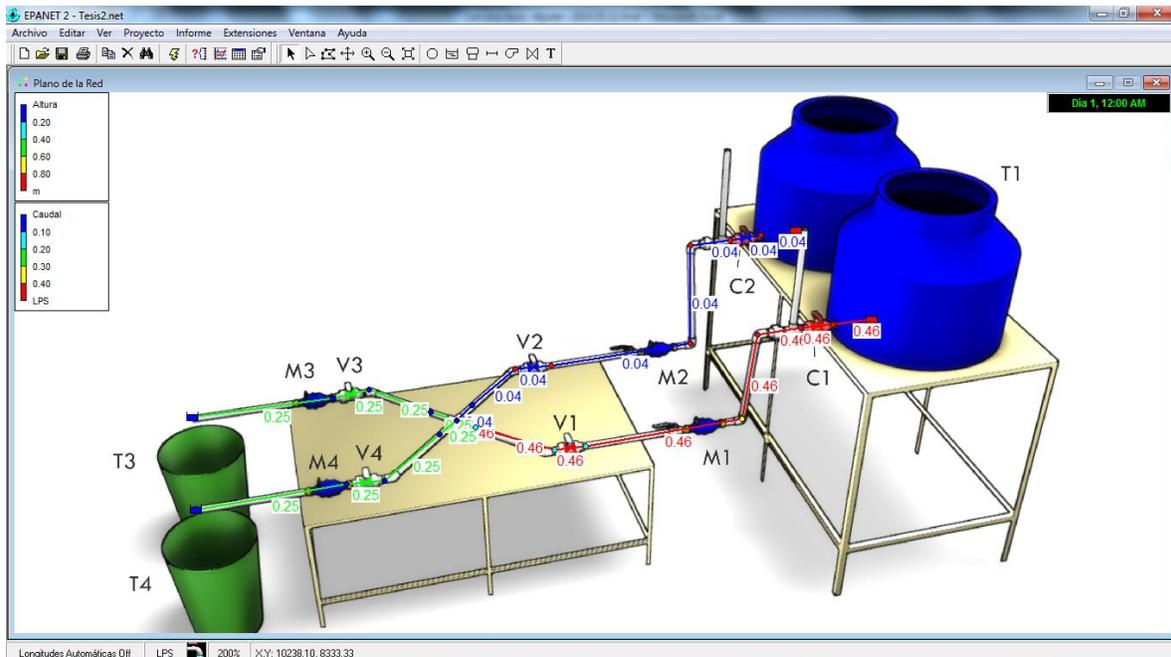


Figura 16. Modelo digital de EpaNet para la prueba No. 4

6.3 Instrumentos utilizados en el modelo físico

Los instrumentos utilizados en el modelo físico son; medidores de agua potable, termómetro digital, equipo para medir la conductividad del agua y cámaras de video tipo WEB. Las características de los instrumentos utilizados se describen a continuación.

6.3.1 Medidor de agua volumétrico.

Para realizar la medida del caudal que fluye por cada una de las tuberías que se unen con la cruz, se utilizan medidores para agua potable tipo volumétrico con un diámetro nominal de 1 pulgada marca ControlAgua. Estos medidores cumplen con la Norma Técnica Colombiana NTC 1063 de 2007 y corresponden a la clase metrológica R160, con una resolución de 0,02 L y fabricados en el año 2013. Los medidores han sido calibrados por un laboratorio acreditado para tal fin (Hidrométrica SA), y corresponden a los siguientes números de serie:

M1: 13 006070
M2: 13 006062
M3: 13 006046
M4: 13 006064



Fotografía 2. Medidor volumétrico utilizado para el experimento

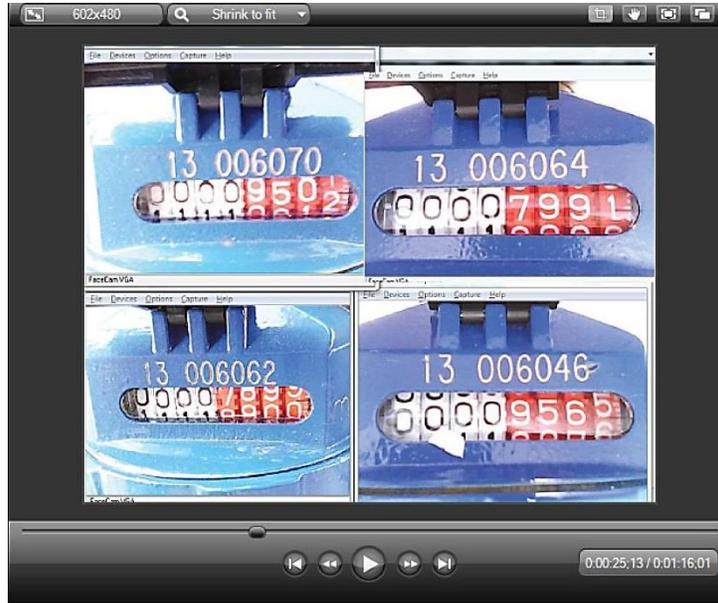
El valor del caudal que discurre por cada medidor (y a su vez por cada tubería), se calcula hallando las diferencias de los volúmenes

Con el agua fluyendo a través del medidor de manera estable, se toma una fotografía instantánea del video del inicio del cronometraje de la prueba y la final del tiempo de la misma, de tal manera que se conoce el volumen inicial, el volumen final, dando el volumen de agua que discurre a través

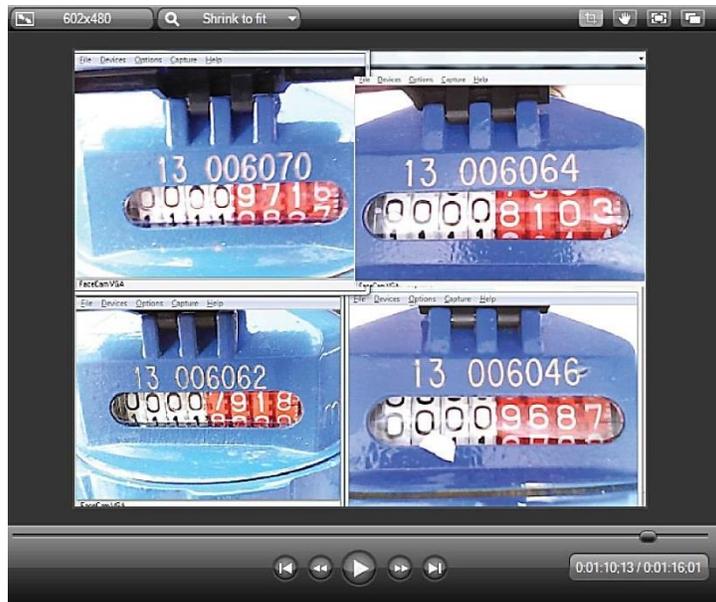
del medidor. Este volumen dividido el tiempo cronometrado nos indica el caudal que fluyó a través del medidor, así:

$$Q_m = \frac{L_{fin} - L_{ini}}{t_{fin} - t_{ini}}$$

Ecuación 60



Fotografía 3. Lecturas iniciales de los medidores para una de las pruebas realizadas



Fotografía 4. Lecturas finales de los medidores para una de las pruebas realizadas



Fotografía 5. Montaje de la cámara web y ajuste de la imagen en el software de video

6.3.1.1 Ajuste de las medidas de caudal.

Los medidores utilizados están calibrados por Hidrométrica S.A.¹⁸, laboratorio acreditado para tal fin por la ONAC¹⁹, los correspondientes certificados de calibración se encuentra adjuntos en los anexos.

El ajuste del volumen medido se realiza a través de la información contenida en los certificados de calibración individuales de cada medidor.

Los datos metrológicos de todos los medidores según la NTC 1063 de 2007, son:

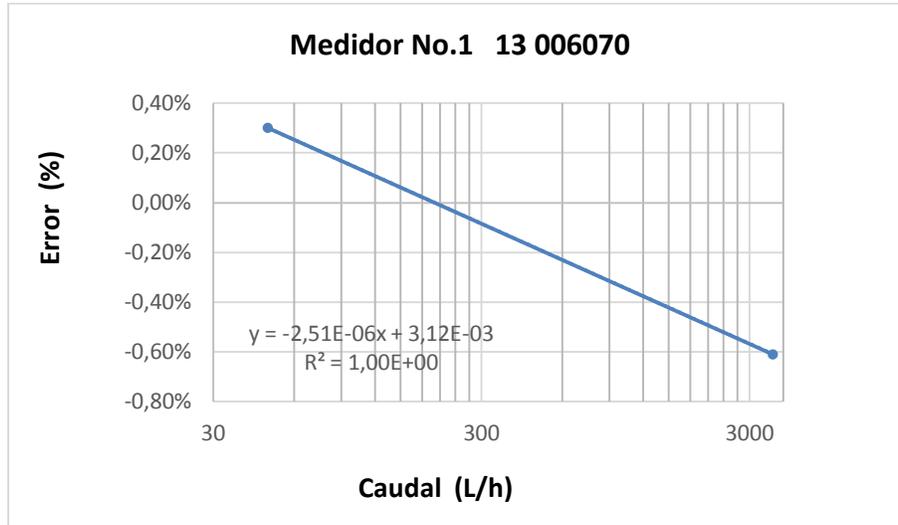
- Q_3 , Caudal nominal de 4 000 L/h (error relativo máximo de $\pm 2\%$)
- Q_4 , Caudal máximo de 5 000 L/h (error relativo máximo de $\pm 2\%$)
- Q_1 , Caudal mínimo de 25 L/h (R160) (error relativo máximo de $\pm 5\%$)
- Q_2 , Caudal de transición de 40 L/h (error relativo máximo de $\pm 2\%$)

Dado que todos los caudales de la pruebas fueron superiores a Q_2 e inferiores a Q_3 , se toman los errores relativos de los certificados de calibración de cada medidor y se realiza una línea que una los dos puntos coordenados (Caudal, Error relativo %); para Q_2 y Q_3 , se halla la ecuación de esa línea recta y se utiliza para corregir todos los caudales de la prueba para cada medidor. Un ejemplo se muestra a continuación con la línea realizada para el medidor de agua M1: 13 006070²⁰.

¹⁸ Laboratorio Nacional de Calibración de Medidores e Hidráulica, Hidrométrica S.A.

¹⁹ ONAC, Organismo Nacional de Acreditación de Colombia

²⁰ Ver certificado anexo de Hidrométrica S.A. CC1303201907.



Gráfica 3. Corrección del error en porcentaje en el medidor No. 1 - 13 006070

Con la ecuación obtenida, se calcula el error y con este se ajusta el caudal medido, obteniendo el caudal ajustado. Realizadas las anteriores operaciones se hace una tabla de ajuste de caudales para cada prueba y toma de datos como se muestra a continuación.

Tabla 4. Cálculo del caudal ajustado para la prueba No. 4, toma 2

Prueba No. 4 - Toma No. 2							
Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	971,63	950,16	21,47	0,477	1.717,6	-0,12%	0,478
2	791,82	789,95	1,87	0,042	149,6	0,09%	0,042
3	968,72	956,55	12,17	0,270	973,6	-0,14%	0,271
4	810,32	799,10	11,22	0,249	897,6	0,09%	0,249

6.3.2 Termómetro digital

Durante el desarrollo del experimento y para cada prueba, se midió la temperatura del agua, en los cuatro tanques. El sensor usado para la verificación de la temperatura durante las pruebas, corresponde a una RTD (Resistance Temperature Detector), detector de temperatura resistivo.



Fotografía 6. Dispositivo termo-resistivo digital utilizado para el experimento

Este dispositivo termo-resistivo corresponde a una PT100²¹, es de marca EBCHQ, referencia 58103 y tiene las siguientes características metrológicas:

- Rango de medición de -50°C a 300°C
- Resolución de 0,1°C
- Profundidad de inmersión del bulbo de hasta 70mm
- Exactitud de $\pm 1^\circ\text{C}$ de 0°C a 100°C y $\pm 2^\circ\text{C}$ de 100°C en adelante
- Modelo S-HO3 Ref. 58103

6.3.2.1 Ajuste de las medidas de temperatura

Para el ajuste de la medida de temperatura del agua se utiliza un termómetro de precisión patrón marca H-B instrument Enviro-Safe, con las siguientes características metrológicas:

- Rango de medición de -1°C a 51°C
- División de escala de 0,1°C
- Profundidad de inmersión del bulbo de 76mm
- Exactitud de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ en toda la escala
- Longitud de 460mm
- Modelo 20504

Este medidor patrón fue calibrado por MetroCal Ltda²², según el certificado de calibración número TE-0022-10 (ver anexo). Según este certificado de calibración la corrección de la temperatura para 15°C es de 0,2°C y para 20°C es de 0,1°C y en ambos casos la incertidumbre de medida es de $\pm 0,18^\circ\text{C}$. Dado estos datos las temperaturas medidas están dentro del rango de 16°C a 19°C, por tanto la corrección del valor medido está dentro del rango de la incertidumbre, de manera tal, que para efectos prácticos el valor leído del termómetro patrón se tomara como el de referencia para ajustar la lectura de la PT100.

Al comparar el patrón con la PT100, se observa que la temperatura indicada por la PT100 es la misma indicada por el medidor patrón, tal como se muestra en las fotografías subsiguientes.

²¹ PT100. Sensor de temperatura basado en la resistencia eléctrica que impide el flujo de corriente a través de un alambre de platino y cuyo valor cambia con la temperatura. Para una temperatura de 0°C el valor de la resistencia corresponde a 100Ω.

²² MetroCal Ltda, Metrología y Calibración Ltda, acreditado por la SIC para calibración de instrumentos de medida de temperatura.



Fotografía 7. Lectura de temperatura en el patrón



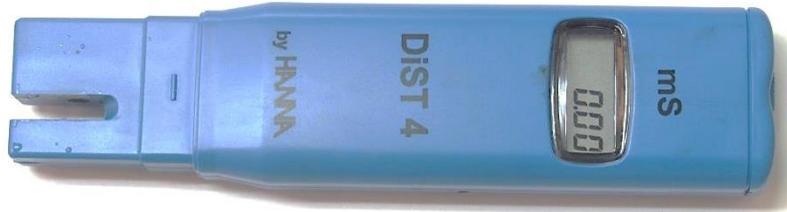
Fotografía 8. Comparación temperatura en el patrón con los equipos termo-resistivos utilizados

Ya que la temperatura medida es igual a la del patrón se decide no hacer ninguna corrección por temperatura a los datos medios de esta unidad.

6.3.3 Medidor de conductividad

La medición de la conductividad se realizó con un equipo producido por la firma Hanna Instruments, modelo DiST 4, con las siguientes características metrológicas:

- Rango de medición de 0 a 19,99 mS/cm
- Resolución de 0,01 nS/cm
- Profundidad de inmersión del instrumento 90mm
- Exactitud de $\pm 2\%$ de toda la escala ($\pm 0,4$ mS/cm)
- Compensación por temperatura de manera automática entre 0°C y 50°C
- Modelo DiST 4



Fotografía 9. Medidor de conductividad utilizado en el experimento

6.3.3.1 Ajuste de la medida de conductividad

El ajuste de la medida de conductividad se realiza con una solución patrón suministrada por el fabricante. El equipo se calibra en un solo punto. La solución patrón está en medio acuosa y tiene un valor de 12,88 mS/cm a una temperatura de 25°C.



Fotografía 10. Verificación de la lectura de la conductividad respecto a la temperatura del agua según certificación del fabricante

Con la temperatura medida por la PT100, se confirma si se ajusta el valor de la conductividad según la tabla de variación de la conductividad con respecto a la temperatura suministrada por el fabricante de la solución patrón.

6.3.4 Cámaras de tipo WEB y toma de imágenes

La captura de los vídeos se realizó por medio de 4 cámaras web, una por cada medidor de agua, marca Genius FaceCam 321 de 8 Mega pixeles con conexión USB 2.0, micrófono incorporado,

velocidad de fotogramas de 30 fps (fotogramas por segundo) y enfoque manual. Las señales fueron concentradas en un par de ordenadores, que utilizan el software nativo de la cámara web para registrar en formato digital los vídeos de cada una de las pruebas de las cuatro cámaras al mismo tiempo.



Fotografía 11. Posicionamiento de la cámara web sobre el medidor de volumen

En el procedimiento de realización de la prueba una persona accionaba una claqueta y su sonido era registrado por cada una de las cámaras, este sonido permite que en el momento de la edición se sincronicen todas las muestras de vídeo alineando en el mismo punto el pico de la onda de sonido generado por la claqueta. En la edición se realizó, por cada prueba, una impresión de pantalla en los momentos: de inicio (marcado por el sonido de la claqueta) y final (45 segundos exactos determinados por el cronómetro del software de vídeo con exactitud de 0.03 segundos) a partir de dichas imágenes (inicio y final) era posible determinar cuánto volumen había sido registrado por cada uno de los medidores en el tiempo mencionado y así calcular el caudal en cada uno de los puntos de medición.



Fotografía 12. Ejecución del experimento y control de los datos

6.4 Solute utilizado en el experimento

Como soluto para realizar el experimento se usó sal de cocina refinada de alta pureza marca Refisal con las siguientes características:



Fotografía 13. Solute utilizado

- Granulometría fina, para que la sal se disuelva rápidamente en el agua (solvente)
- Concentración de Fluor de 180 a 220 ppm
- Concentración de Yodo de 50 a 100 ppm

6.5 Tuberías y accesorios en PVC

Las tuberías utilizadas para la prueba fueron suministradas por la firma PAVCO, fabricadas en PVC. La norma de fabricación de la tubería corresponde a la ASTM D2241-09, tubos de policloruro de vinilo (PVC), clasificados según la presión (serie RDE), RDE 21, con un diámetro nominal de 1 pulgada y diámetro interno de 30,20 mm.

La unión tipo cruz usada para el experimento está fabricada en PVC, por la firma LASCO y corresponde a la norma ASTM D2466 – 13, "accesorios de policloruro de vinilo (PVC) Schedule 40".

7 Desarrollo del experimento y metodología

Para el desarrollo del experimento se cuenta con un sistema de distribución de tuberías y suministro de agua concebido para tal fin. El procedimiento metodológico se describe a continuación, así como los escenarios que se dispusieron para el experimento.

7.1 Paso a paso de ejecución de cada prueba del experimento.

Los pasos seguidos para el desarrollo de cada prueba del experimento se detallan a continuación.

1. Verificar que todos los elementos necesarios para el desarrollo del experimento se encuentren en perfectas condiciones de uso, en la cantidad y calidad suficiente para el desarrollo del mismo (Tales como el sistema de suministro de agua potable, medidores de caudal, sistema de aforo, medidor de temperatura, medidor de conductividad, sistema de cámaras de video y otros).
2. Confirmar el estado inicial de las válvulas que componen el sistema según muestra en la tabla a continuación, y el estado de las válvulas para cada escenario.

Tabla 5. Estado de operación de las válvulas para los diferentes escenarios

Escenario	Válvulas					
	C1	C2	V1	V2	V3	V4
Inicio	Cerrada	Cerrada	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta
1	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta
2	Abierta	Abierta	Abierta	Cerrada 25°	Abierta	Abierta
3	Abierta	Abierta	Abierta	Cerrada 45°	Abierta	Abierta
4	Abierta	Abierta	Abierta	Cerrada 65°	Abierta	Abierta
5	Abierta	Abierta	Cerrada 25°	Abierta	Abierta	Abierta
6	Abierta	Abierta	Cerrada 45°	Abierta	Abierta	Abierta
7	Abierta	Abierta	Cerrada 65°	Abierta	Abierta	Abierta
8	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta	Cerrada 25°	Abierta
9	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta	Cerrada 45°	Abierta
10	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta	Cerrada 65°	Abierta
11	Abierta	Abierta	Cerrada 45°	Abierta	Abierta	Cerrada 45°
12	Abierta	Abierta	Cerrada 45°	Abierta	Cerrada 45°	Abierta

3. Llenar los tanques T_1 y T_2 con agua potable hasta la mitad de su capacidad. Abrir las válvulas C_1 y C_2 , totalmente, manteniendo V_1 y V_2 cerradas, confirmar que no existen fugas en el sistema. Abrir las válvulas V_1 y V_2 , si no hay fugas en el sistema abrir las válvulas V_3 y V_4 , y dejar fluir el agua totalmente.
4. Una vez desocupados los tanques, cerrar las válvulas C_1 y C_2 .

5. Llenar los tanques T_1 y T_2 con agua potable con el volumen necesario para el experimento (250 L). Agregar al tanque T_1 suficiente sal de cocina, de tal manera que su conductividad llegue al menos a 11 mS; agitar el tanque T_1 de manera tal que asegure una dilución de la sal de cocina dentro del agua potable.
6. Regular el caudal de salida de los tanques con las válvulas V_1 o V_2 (Depende del experimento a realizar los caudales pueden ser iguales o diferentes; confirmar la relación de caudales para cada experimento de la tabla del numeral 2)
7. Medir la temperatura del agua en cada uno de los tanques T_1 y T_2 , y registrarla en el formato de toma de datos.
8. Medir la conductividad del agua en cada uno de los tanques T_1 y T_2 , y registrarla en el formato de toma de datos.
9. Preparar el sistema de video cámaras para los medidores de agua.
10. Preparar y desocupar los tanques de recolección T_3 y T_4
11. Regular las válvulas V_1, V_2, V_3 o V_4 según sea el caso de la prueba experimental.
12. Iniciar el sistema de grabación de video.
13. Abrir las válvulas de control C_1 y C_2 al tiempo y totalmente
14. Dejar fluir agua a través del sistema durante al menos 15 segundos para que el flujo se estabilice.
15. Marcar el inicio del conteo en el sistema de grabación y al mismo tiempo dirigir los flujos de salida a los tanques T_3 y T_4
16. Dejar fluir el agua durante 45 s, inmediatamente cumplido este tiempo, cerrar las válvulas C_1 y C_2 y retirar el flujo de agua de salida que va hacia los tanques de recolección T_3 y T_4 .
17. Medir la conductividad del agua y su temperatura del tanque de recolección T_3 y registrarlo.
18. Medir la conductividad del agua y su temperatura del tanque de recolección T_4 y registrarlo.
19. Purgar todo el sistema de tuberías y agregar agua limpia a través de las almenaras de los tanques T_1 y T_2 para la limpieza del modelo.
20. Desocupar los tanques de recolección T_3 y T_4 , y lavarlos con agua suficiente.
21. Confirmar el estado de las válvulas para la siguiente prueba.
22. Repetir los pasos anteriores para realizar una nueva prueba.

7.2 Escenarios del experimento

Para determinar la validez de las ecuaciones propuestas por Ho y Romero, así como para entender el discurrir del agua a través de una cruz y la distribución de las concentraciones se ha propuesto desarrollar 12 escenarios que cubran diferentes formas de distribución del flujo del agua a través de la cruz, con diferentes concentraciones y caudales.

7.2.1 Escenario #1

Para el escenario #1, se prepara una solución acuosa para el tanque 1, que contiene agua del sistema de acueducto de Bogotá y sal de comedor, en determinada concentración que permita alcanzar una conductividad superior a 10 mS. Se llena el tanque #1 (T_1), con la solución se agua y sal preparada y el tanque #2 con agua del sistema de acueducto de Bogotá. Ambos tanques de agua se llenan hasta el mismo nivel. Todas las válvulas del modelo se dejan totalmente abiertas (V_1 , V_2 , V_3 y V_4). Se permite que fluya el agua abriendo rápidamente las válvulas de control C_1 y C_2 . Luego de un determinado tiempo, se evalúa el valor de la conductividad en los tanques de recolección T_3 y T_4 . Con los medidores de agua instalados se confirma el valor del caudal que fluye a través de cada tubería conectada a la cruz.

Se espera en este escenario que los caudales de ingreso sean idénticos, de manera tal que no exista mezcla alguna de los flujos que ingresan a la cruz por la V_1 y la V_2 , obteniendo en T_3 y T_4 , las mismas concentraciones que en T_2 y T_1 respectivamente.

7.2.2 Escenario #2

Idéntico al Escenario #1, pero con la válvula V_2 cerrada 25° aproximadamente. Se espera en este escenario, que ingrese a la cruz un mayor caudal de agua a través de la válvula V_1 y que los caudales de salida sean muy similares a través de las válvulas V_3 y V_4 . El valor final de las concentraciones se estimará la final para cada tanque de recolección T_3 y T_4 .

7.2.3 Escenario #3

Idéntico al Escenario #2, pero con la válvula V_2 cerrada 45° aproximadamente. Se espera en este escenario, que ingrese a la cruz un mayor caudal de agua a través de la válvula V_1 y que los caudales de salida sean un poco diferentes a través de las válvulas V_3 y V_4 . Teniendo V_3 un mayor caudal que V_4 . El valor final de las concentraciones se estimará la final para cada tanque de recolección T_3 y T_4 .

7.2.4 Escenario #4

Idéntico al Escenario #3, pero con la válvula V_2 cerrada 65° aproximadamente. Se espera en este escenario, que ingrese a la cruz un mayor caudal de agua a través de la válvula V_1 y que los caudales de salida sean significativamente diferentes a través de las válvulas V_3 y V_4 . Teniendo V_3 un mayor caudal que V_4 . El valor final de las concentraciones se estimará la final para cada tanque de recolección T_3 y T_4 .

7.2.5 Escenario #5

Idéntico al Escenario #1, pero con la válvula V_1 cerrada 25° aproximadamente. Se espera en este escenario, que ingrese a la cruz un mayor caudal de agua a través de la válvula V_2 y que los caudales de salida sean muy similares a través de las válvulas V_3 y V_4 . El valor final de las concentraciones se estimará la final para cada tanque de recolección T_3 y T_4 .

7.2.6 Escenario #6

Idéntico al Escenario #5, pero con la válvula V_1 cerrada 45° aproximadamente. Se espera en este escenario, que ingrese a la cruz un mayor caudal de agua a través de la válvula V_2 y que los caudales de salida sean un poco diferentes a través de las válvulas V_3 y V_4 . Teniendo V_4 un mayor caudal que V_3 . El valor final de las concentraciones se estimara la final para cada tanque de recolección T_3 y T_4 .

7.2.7 Escenario #7

Idéntico al Escenario #6, pero con la válvula V_2 cerrada 65° aproximadamente. Se espera en este escenario, que ingrese a la cruz un mayor caudal de agua a través de la válvula V_2 y que los caudales de salida sean un poco diferentes a través de las válvulas V_3 y V_4 . Teniendo V_4 un mayor caudal que V_3 . El valor final de las concentraciones se estimara la final para cada tanque de recolección T_3 y T_4 .

7.2.8 Escenario #8

Idéntico al Escenario #1, pero con la válvula V_3 cerrada 25° aproximadamente. Se espera en este escenario, que salga de la cruz un mayor caudal de agua a través de la válvula V_4 y que los caudales de entrada sean muy similares a través de las válvulas V_1 y V_2 . El valor final de las concentraciones se estimara la final para cada tanque de recolección T_3 y T_4 .

7.2.9 Escenario #9

Idéntico al Escenario #8, pero con la válvula V_3 cerrada 45° aproximadamente. Se espera en este escenario, que salga de la cruz un mayor caudal de agua a través de la válvula V_4 y que los caudales de entrada sean un poco diferentes a través de las válvulas V_1 y V_2 . El valor final de las concentraciones se estimara la final para cada tanque de recolección T_3 y T_4 .

7.2.10 Escenario #10

Idéntico al Escenario #9, pero con la válvula V_3 cerrada 65° aproximadamente. Se espera en este escenario, que salga de la cruz un mayor caudal de agua a través de la válvula V_4 y que los caudales de entrada sean diferentes a través de las válvulas V_1 y V_2 . El valor final de las concentraciones se estimara la final para cada tanque de recolección T_3 y T_4 .

7.2.11 Escenario #11

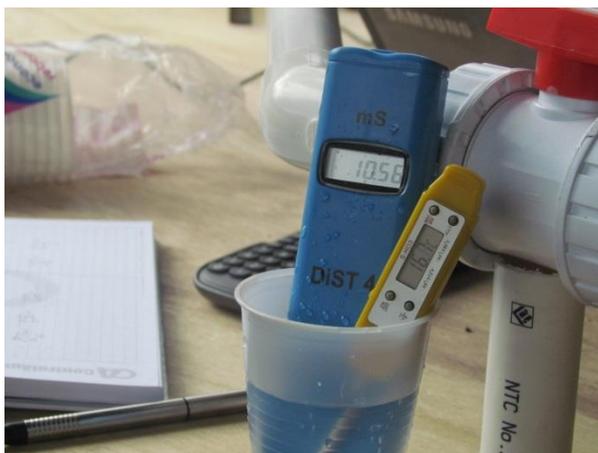
Idéntico al Escenario #1, pero con las válvulas V_1 y V_4 cerradas 45° aproximadamente. Se espera en este escenario, que salga de la cruz un mayor caudal de agua a través de la válvula V_4 y que los caudales de entrada sean muy diferentes a través de las válvulas V_1 y V_2 . El valor final de las concentraciones se estimara la final para cada tanque de recolección T_3 y T_4 .

7.2.12 Escenario #12

Idéntico al Escenario #11, pero con las válvulas V_1 y V_3 cerradas 45° aproximadamente. Se espera en este escenario, que salga de la cruz un mayor caudal de agua a través de la válvula V_4 y que los caudales de entrada sean muy diferentes a través de las válvulas V_1 y V_2 . El valor final de las concentraciones se estimara la final para cada tanque de recolección T_3 y T_4 .

7.3 Toma de los datos

La toma de los datos durante el desarrollo del experimento se realizó con la instrumentación descrita anteriormente. Todos los datos de temperatura y conductividad fueron consignados en el formato realizado para tal fin en computador. Para tener la medida confiable se esperó en cada toma de la medida el tiempo necesario para que los instrumentos indicaran una medida estable, aproximadamente 2 minutos por toma. Para garantizar la calidad de la medida se limpia cada instrumento con agua potable antes de ser utilizado para evitar trazas de las anteriores mediciones.



Fotografía 14. Medición de conductividad y temperatura del agua durante el experimento

Tabla 6. Mediciones realizadas durante la ejecución de la prueba No. 4, toma 2

Prueba No. 4 - Toma No. 2				
Condición:	Válvula 2 cerrada 67,5°			
Tanque No 1				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Conductividad (mS/cm)	11,65	11,65	11,64	11,647
Temperatura (°C)	15,90	15,90	15,80	15,867
Tanque No 3				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Conductividad (mS/cm)	10,44	10,43	10,43	10,433
Temperatura (°C)	16,30	16,40	16,50	16,400
Tanque No 4				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Conductividad (mS/cm)	11,24	11,25	11,26	11,250
Temperatura (°C)	16,40	16,30	16,40	16,367

7.4 Relación entre la conductividad y la concentración de sal en la solución

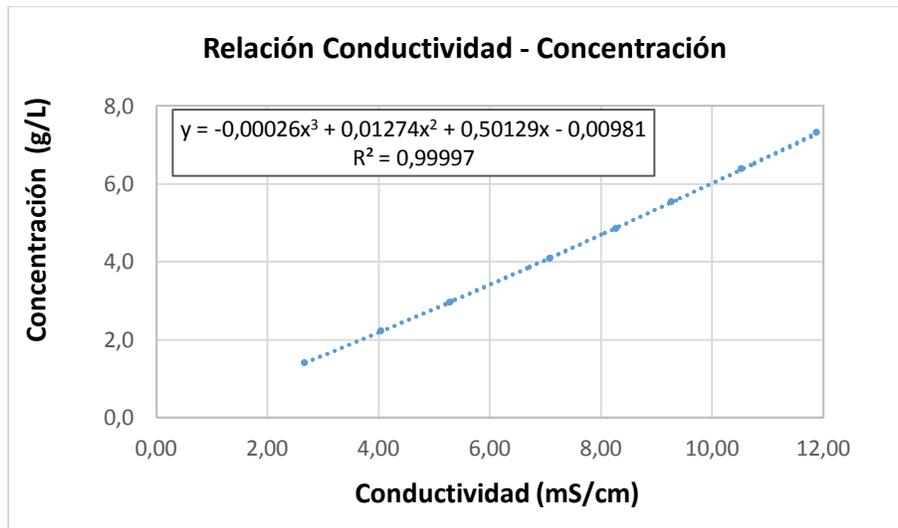
Para poder determinar la cantidad de gramos sal necesaria para realizar una concentración determinada y poderla evaluar a través de la conductividad se realiza un ensayo que relacione el cambio de la conductividad del agua con base en una cantidad de masa de sal medida y adicionada a un volumen de agua conocido (agua del acueducto de Bogotá en el lugar del experimento).

En un vaso de Griffin de 1L se llena con agua potable igual a la que se usará durante la prueba. Se mide la temperatura del agua y la conductividad de la misma. Luego en una pesa de precisión con resolución de 0,01g, se pesa pequeñas cantidades de sal de cocina; esta cantidad se adiciona al volumen de agua se mezcla vigorosamente y se mide de nuevo la temperatura y la conductividad, desarrollando la tabla que se observa a continuación:

Tabla 7. Cálculo de la concentración de soluto como función de la conductividad medida

# DOSIS	SAL AGREGADA (g)	SAL TOTAL (g)	CONDUCTIVIDAD (mS/cm)	TEMPERATURA °C	VOLUMEN AGUA (L)	CONCENTRACIÓN (g/L)
0	0,00	0,00	0,042	17,70	1,00	0,000
1	0,77	0,77	1,505	17,70	1,00	0,770
2	0,65	1,42	2,675	17,80	1,00	1,415
3	0,78	2,20	4,05	17,90	0,99	2,217
4	0,74	2,93	5,29	18,00	0,99	2,960
5	1,08	4,01	7,08	18,30	0,98	4,092
6	0,74	4,75	8,28	18,50	0,98	4,847
7	0,63	5,38	9,27	18,60	0,97	5,546
8	0,81	6,19	10,53	18,70	0,97	6,381
9	0,91	7,10	11,89	18,70	0,97	7,320

Con los datos obtenidos se grafica la concentración como función de la conductividad, y se halla la ecuación correspondiente, tal como se muestra a continuación:



Gráfica 4. Relación existente entre la conductividad y la concentración del soluto en el agua

La ecuación hallada se utiliza para determinar la concentración del soluto en la solución y poder desarrollar la metodología que permita hallar una fórmula para inferir las concentraciones del soluto a la salida de una cruz.

7.5 Estimación de la viscosidad cinemática y densidad del agua

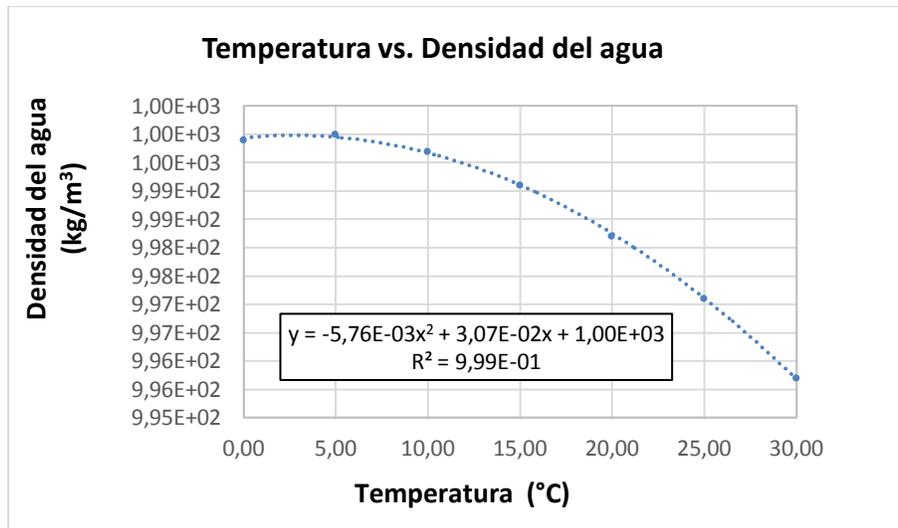
Para determinar la densidad y la viscosidad cinemática²³ del agua se graficó los datos que se encuentran en la Tabla A.1.1, del libro de Hidráulica de Tuberías, así:

Tabla 8. Relación de la densidad y la viscosidad cinemática del agua con la temperatura

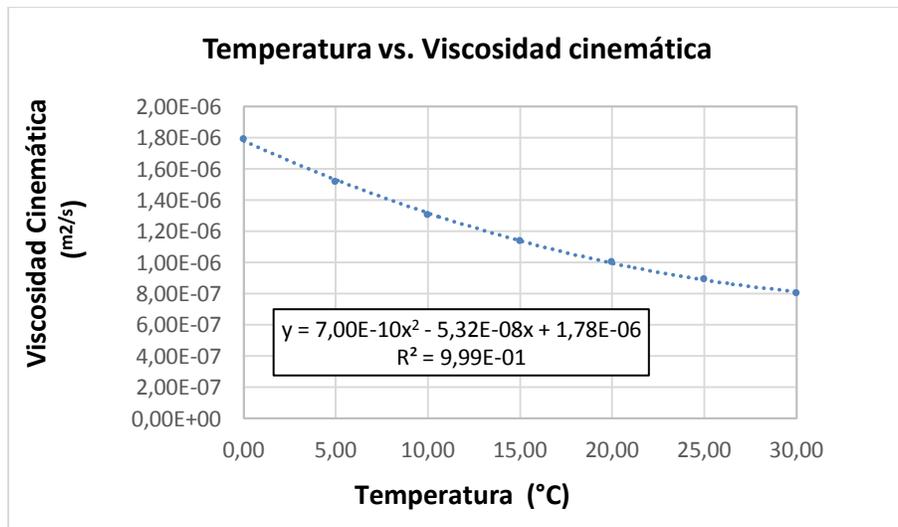
Temperatura °C	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad cinemática (m ² /s)
0	999,90	1,79E-06
5	1000,00	1,52E-06
10	999,70	1,31E-06
15	999,10	1,14E-06
20	998,20	1,01E-06
25	997,10	8,97E-07
30	995,70	8,04E-07

Aunque la densidad del agua cambia al agregar la sal, la cantidad es tan mínima que se supone que la densidad no cambia por agregar está.

²³ Saldarriaga V. Juan G. (2009). *Hidráulica de tuberías: Abastecimiento de Agua, Redes y Riegos*. Bogotá: Alfaomega.



Gráfica 5. Relación existente entre la temperatura del agua y su densidad



Gráfica 6. Relación existente entre la temperatura del agua y su viscosidad cinemática

7.6 Cálculos hidráulicos

Con base en la información obtenida correspondiente al caudal que fluye a través de cada tubería para cada prueba y toma de datos, se procedió a determinar la velocidad, el Número de Reynolds y la fuerza derivada de la cantidad de movimiento dentro de cada tubería, esta información es valiosa para realizar comparaciones de otros métodos propuestos por Romero-Gómez y Ho, para estimar las concentraciones de salida y su relación con el Número de Reynolds.

Tabla 9. Parámetros hidráulicos calculados para la prueba No. 4, toma 2

Prueba No. 4 - Toma No. 2						
Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,48	15,87	1,112E-06	0,67	18.106	0,318
2	0,04	15,87	1,112E-06	0,06	1.574	0,002
3	0,27	16,40	1,096E-06	0,38	10.418	0,102
4	0,25	16,37	1,097E-06	0,35	9.575	0,087

7.7 Cálculos de la conductividad y concentración del soluto

Para determinar la conductividad final en cada prueba, está se midió con el equipo descrito anteriormente, dado que el mismo hace corrección por temperatura, se deja el mismo valor medido. La temperatura indicada se mide con la PT100.

Para determinar el valor de la concentración presente en el agua que se tienen en T1 y T2, recolectada en T3 y T4, se utiliza la ecuación hallada en el numeral que relaciona la conductividad con la concentración del agua los resultados se muestran continuación:

Tabla 10. Concentración calculada del soluto durante la prueba No. 4, toma 2 y concentraciones calculadas mediante las ecuaciones estudiadas.

Prueba No. 4 - Toma No. 2					
Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS/cm)	Temperatura °C	Conductividad corregida por (mS/cm)	Concentración (g/L)
1	0,48	11,65	15,87	11,65	7,15
2	0,04	0,05	15,87	0,05	0,01
3	0,27	10,43	16,40	10,43	6,32
4	0,25	11,25	16,37	11,25	6,88

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho. C. K.	Romero-Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	6,32	6,04	6,06	6,29
	Error (%)	0%	-4%	-4%	0%
T4	Valor (mg/L)	6,88	7,15	7,15	6,85
	Error (%)	0%	4%	4%	0%

Con el fin de evaluar el comportamiento de las ecuaciones propuestas para las concentraciones de salida y compararlo con otros sistemas de cálculo, se incluye además en la anterior tabla, el valor de las concentraciones C_3 y C_4 , calculadas con las ecuaciones de Ho y Romero-Gómez, y se comparan con el valor medido de los tanques T3 y T4. Para calcular C_3 y C_4 para cada uno de los escenarios involucrados en el experimento mediante las teorías de Clifford K. Ho y Pedro Romero-Gómez, se identifica la formulación correspondiente a cada una de las condiciones simuladas, $Q_1 > Q_2$ y $Q_2 > Q_1$:

7.7.1 Formulación para el cálculo de la concentración a partir de la ecuación de Clifford K. Ho

Partiendo de la teoría de Clifford K. Ho, en donde $Q_1 > Q_2$ y por lo tanto $C_1 = C_4$, se tiene que:

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 = Q_3 C_3 + Q_4 C_4 \quad \text{Ecuación 61}$$

$$C_3 = \frac{Q_2 C_2 + (Q_1 - Q_4) C_1}{Q_3} \quad \text{Ecuación 62}$$

Ahora, suponiendo que $Q_2 > Q_1$, y que por lo tanto $C_2 = C_3$, se tiene que:

$$C_4 = \frac{Q_1 C_1 + (Q_2 - Q_3) C_2}{Q_4} \quad \text{Ecuación 63}$$

Las condiciones de cálculo se pueden resumir de la siguiente forma:

Tabla 11. Ecuaciones para el cálculo de C_3 y C_4 de acuerdo con la relación existente entre Q_1 y Q_2 , según las restricciones planteadas a partir de la ecuación de Ho

	C_3	C_4
$Q_1 > Q_2$	$\frac{Q_2 C_2 + (Q_1 - Q_4) C_1}{Q_3}$	C_1
$Q_2 > Q_1$	C_2	$\frac{Q_1 C_1 + (Q_2 - Q_3) C_2}{Q_4}$

7.7.2 Formulación para el cálculo de la concentración a partir de la ecuación de Pedro Romero-Gómez

Romero-Gómez reescribe la ecuación de Ho, con base en los siguientes términos:

$$\frac{Q_2}{Q_3} = \frac{y + 1}{x + 1} \quad \frac{Q_1}{Q_3} = \frac{y + 1}{1/x + 1}$$

donde:

$$x = \frac{Q_1}{Q_2} \quad y = \frac{Q_4}{Q_3}$$

Con lo que se tiene que si $Q_1 > Q_2$ y por lo tanto $C_1 = C_4$:

$$C_3 = \left(\frac{\left(\frac{Q_4}{Q_3} \right) + 1}{\left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) + 1} \right) C_2 + \left(\frac{\left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) - \left(\frac{Q_4}{Q_3} \right)}{\left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) + 1} \right) C_1 \quad \text{Ecuación 64}$$

Pero si $Q_2 > Q_1$ y por lo tanto $C_2 = C_3$:

$$C_4 = \left(\frac{\left(\frac{Q_3}{Q_4} \right) + 1}{\left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) + 1} \right) C_1 + \left(\frac{\left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) - \left(\frac{Q_3}{Q_4} \right)}{\left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) + 1} \right) C_2 \quad \text{Ecuación 65}$$

Resumiendo:

Tabla 12. Ecuaciones para el cálculo de C3 y C4 de acuerdo con la relación existente entre Q1 y Q2, según las restricciones planteadas a partir de la ecuación de Romero-Gómez

	C_3	C_4
$Q_1 > Q_2$	$\left(\frac{\left(\frac{Q_4}{Q_3} \right) + 1}{\left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) + 1} \right) C_2 + \left(\frac{\left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) - \left(\frac{Q_4}{Q_3} \right)}{\left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) + 1} \right) C_1$	C_1
$Q_2 > Q_1$	C_2	$\left(\frac{\left(\frac{Q_3}{Q_4} \right) + 1}{\left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) + 1} \right) C_1 + \left(\frac{\left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) - \left(\frac{Q_3}{Q_4} \right)}{\left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) + 1} \right) C_2$

La ecuación que se usa para la comparación de los resultados de las concentraciones es la del error relativo:

$$E(\%) = 100 \cdot \left(\frac{C_c - V_m}{V_m} \right) \quad \text{Ecuación 66}$$

donde:

- C_c Es el valor de concentración calculado con las ecuaciones correspondientes a Ho, Romero-Gómez y de concentración estándar (mezcla universal de soluciones acuosas).
- V_m Valor de la concentración medido en el experimento.

7.8 Cálculo de las concentraciones con la estrategia propuesta

Según la estrategia definida para determinar la ecuación de cada concentración, se procede de la siguiente manera:

Tomando todos los valores de las concentraciones (la medida y las calculadas, según lo indicado anteriormente), de las pruebas del experimento, se realiza una tabla para estos datos, para la concentración C_3 como para la concentración C_4 .

La tabla de datos para la concentración C_4 , se muestra a continuación:

Tabla 13. Cálculo de C_4 mediante las ecuaciones anteriores

Prueba	Toma	Medición	Ho		Gómez		Ec. Estándar	
		Conc. (g/L)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)
1	1,00	6,40	7,31	14,4%	7,31	14,4%	6,49	1,5%
	2,00	6,29	7,30	16,0%	7,31	16,1%	6,34	0,8%
	3,00	6,25	7,28	16,5%	7,29	16,5%	6,30	0,7%
2	1,00	6,62	7,27	9,7%	7,27	9,7%	6,64	0,2%
	2,00	6,56	7,24	10,3%	7,24	10,3%	6,56	0,0%
	3,00	6,54	7,21	10,2%	7,21	10,2%	6,57	0,5%
3	1,00	6,63	7,04	6,2%	7,04	6,2%	6,58	-0,6%
	2,00	6,63	7,02	5,9%	7,02	5,9%	6,65	0,3%
	3,00	6,61	6,98	5,7%	6,98	5,7%	6,65	0,6%
4	1,00	6,90	7,16	3,7%	7,16	3,7%	6,86	-0,5%
	2,00	6,88	7,15	4,0%	7,15	4,0%	6,85	-0,4%
	3,00	6,82	7,08	3,8%	7,08	3,8%	6,66	-2,3%
5	1,00	5,91	6,57	11,1%	6,58	11,3%	5,93	0,4%
	2,00	5,91	6,56	11,1%	6,58	11,3%	5,92	0,3%
	3,00	5,84	6,49	11,1%	6,50	11,3%	5,84	0,1%
6	1,00	2,97	3,35	12,8%	3,35	12,9%	3,01	1,6%
	2,00	2,94	3,35	14,0%	3,36	14,2%	3,00	2,1%
	3,00	2,93	3,31	12,9%	3,32	13,2%	2,97	1,3%
7	1,00	0,50	0,81	60,4%	0,81	60,8%	0,55	10,3%
	2,00	0,53	0,81	54,3%	0,81	55,1%	0,56	7,3%
	3,00	0,55	0,81	47,9%	0,81	48,2%	0,56	3,4%
8	1,00	6,09	7,23	18,8%	7,23	18,8%	6,11	0,4%
	2,00	6,02	7,24	20,3%	7,24	20,3%	6,05	0,5%
	3,00	6,16	7,21	17,1%	7,21	17,1%	6,08	-1,3%

Prueba	Toma	Medición	Ho		Gómez		Ec. Estándar	
		Conc. (g/L)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)
9	1,00	5,05	7,22	42,9%	7,22	42,9%	5,00	-1,0%
	2,00	4,68	4,82	2,9%	4,83	3,0%	4,71	0,5%
	3,00	5,13	7,21	40,4%	7,21	40,4%	5,09	-0,9%
10	1,00	3,97	4,09	3,2%	4,09	3,2%	4,06	2,4%
	2,00	4,55	7,28	60,0%	7,28	60,0%	4,53	-0,5%
	3,00	4,30	7,27	69,0%	7,27	69,0%	4,28	-0,3%
11	1,00	5,23	10,46	100,0%	10,47	100,1%	5,91	12,9%
	2,00	5,38	10,34	92,1%	10,34	92,2%	5,77	7,2%
	3,00	5,35	10,35	93,4%	10,35	93,4%	5,80	8,5%
12	1,00	2,67	2,85	7,0%	2,85	7,0%	2,77	3,9%
	2,00	2,66	2,81	5,8%	2,81	5,6%	2,73	2,6%
	3,00	2,69	2,89	7,5%	2,89	7,4%	2,80	4,1%

La tabla de datos para la concentración C_3 , se muestra a continuación:

Tabla 14. Cálculo de C_3 mediante las ecuaciones anteriores

Prueba	Toma	Medición	Ho		Gómez		Ec. Estándar	
		Conc. (g/L)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)
1	1,00	0,94	0,15	-83,5%	0,36	-61,5%	1,03	10,0%
	2,00	0,93	0,01	-98,5%	0,01	-98,5%	0,98	5,2%
	3,00	0,97	0,01	-98,6%	0,01	-98,6%	1,01	4,5%
2	1,00	1,26	0,65	-48,5%	0,66	-48,1%	1,28	1,2%
	2,00	1,32	0,65	-50,3%	0,66	-49,8%	1,32	0,0%
	3,00	1,22	0,60	-51,2%	0,60	-51,2%	1,25	2,4%
3	1,00	4,29	3,87	-9,8%	3,90	-9,1%	4,25	-0,9%
	2,00	4,24	3,90	-8,1%	3,90	-8,1%	4,26	0,4%
	3,00	4,20	3,88	-7,4%	3,87	-7,7%	4,24	0,9%
4	1,00	6,33	6,05	-4,3%	6,10	-3,6%	6,29	-0,5%
	2,00	6,32	6,04	-4,4%	6,06	-4,1%	6,29	-0,4%
	3,00	6,34	5,96	-6,0%	6,00	-5,5%	6,20	-2,3%
5	1,00	0,64	0,01	-97,9%	0,01	-97,9%	0,66	3,5%
	2,00	0,65	0,01	-97,9%	0,01	-97,9%	0,66	2,4%
	3,00	0,65	0,01	-97,9%	0,01	-97,9%	0,65	0,7%

Prueba	Toma	Medición			Ho		Gómez		Ec. Estándar	
		Conc. (g/L)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)		
6	1,00	0,35	0,01	-96,1%	0,01	-96,1%	0,40	13,5%		
	2,00	0,37	0,01	-96,3%	0,01	-96,3%	0,43	17,1%		
	3,00	0,36	0,01	-96,2%	0,01	-96,2%	0,40	10,5%		
7	1,00	0,27	0,01	-95,0%	0,01	-95,0%	0,33	19,4%		
	2,00	0,27	0,01	-94,9%	0,01	-94,9%	0,31	14,8%		
	3,00	0,26	0,01	-94,9%	0,01	-94,9%	0,28	7,3%		
8	1,00	0,66	-0,69	-203,2%	-0,68	-202,5%	0,70	4,9%		
	2,00	0,75	-0,68	-190,7%	-0,68	-189,8%	0,79	4,8%		
	3,00	0,81	-0,56	-168,4%	-0,54	-166,7%	0,72	-11,9%		
9	1,00	0,41	-5,83	-1522,0%	-5,82	-1520,1%	0,26	-35,6%		
	2,00	0,34	0,01	-95,9%	0,01	-95,9%	0,40	19,9%		
	3,00	0,40	-5,61	-1504,0%	-5,63	-1509,2%	0,27	-31,4%		
10	1,00	0,20	0,01	-93,3%	0,01	-93,3%	0,75	270,5%		
	2,00	0,26	-15,68	-6145,1%	-15,71	-6157,6%	0,13	-50,5%		
	3,00	0,31	-17,01	-5661,8%	-17,00	-5658,9%	0,23	-24,4%		
11	1,00	0,99	0,01	-98,6%	0,01	-98,6%	1,14	14,6%		
	2,00	0,99	0,01	-98,6%	0,01	-98,6%	1,08	8,4%		
	3,00	0,99	0,01	-98,6%	0,01	-98,6%	1,09	9,8%		
12	1,00	0,24	0,01	-94,3%	0,01	-94,3%	0,53	122,8%		
	2,00	0,25	0,01	-95,9%	0,01	-95,9%	0,45	77,4%		
	3,00	0,27	0,01	-96,1%	0,01	-96,1%	0,58	118,1%		

Se propone la relación entre las variables, para este caso se propone:

$$\frac{Q_1 C_1}{Q_2 C_2} \rightarrow \frac{Q_3 C_3}{Q_4 C_4}$$

Ecuación 67

Se determinan las restricciones para el desarrollo de la ecuación, así:

- R1 = Siempre $Q_1 \geq Q_2, Q_3$ y Q_4 .
- R2 = Siempre $Q_3 \geq Q_4$.
- R3 = Siempre $C_1 > C_2, C_3$ y C_4 .
- R4 = Siempre $C_3 \leq C_4$.
- R5 = Siempre $C_3 > C_2$.

Se determina cuales pruebas cumplen con todas las restricciones, tal como aparece a continuación:

Tabla 15. Cumplimiento de las restricciones planteadas

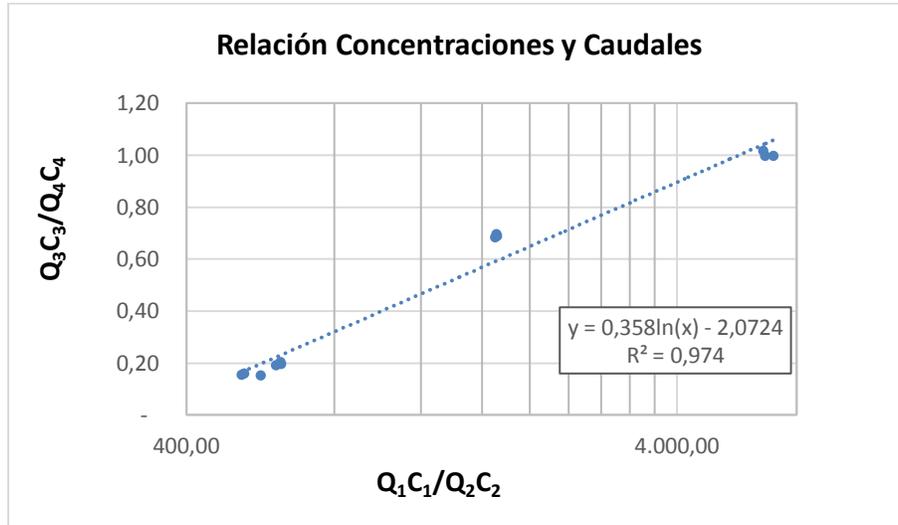
Prueba No.	Restricciones				
	R1	R2	R3	R4	R5
1	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
3	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
4	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
5	Q ₂ mayor	Ok	Ok	Ok	Ok
6	Q ₂ mayor	Ok	Ok	Ok	Ok
7	Q ₂ mayor	Q ₄ > Q ₃	Ok	Ok	Ok
8	Q ₄ mayor	Q ₄ > Q ₃	Ok	Ok	Ok
9	Q ₄ mayor	Q ₄ > Q ₃	Ok	Ok	Ok
10	Q ₄ mayor	Q ₄ > Q ₃	Ok	Ok	Ok
11	Q ₃ mayor	Ok	Ok	Ok	Ok
12	Q ₄ mayor	Q ₄ > Q ₃	Ok	Ok	Ok

Con las pruebas que cumplen las restricciones se procede a hallar la ecuación de relación, así

Tabla 16. Cálculo de la razón entre las masas entrantes y entre las masas salientes con relación al tiempo

Pru. / toma	Q ₁ C ₁ /Q ₂ C ₂	Q ₃ C ₃ /Q ₄ C ₄
P1/t1	566,82	0,15
P1/t2	517,95	0,15
P1/t3	524,75	0,16
P2/t1	623,63	0,20
P2/t2	623,17	0,21
P2/t3	610,43	0,19
P3/t1	1.715,33	0,70
P3/t2	1.717,64	0,69
P3/t3	1.705,32	0,68
P4/t1	6.282,40	1,00
P4/t2	6.045,39	1,00
P4/t3	5.989,72	1,02

La ecuación resultante de la regresión se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 7. Relación encontrada entre la distribución de masas de entrada y de salida de la cruz, en el tiempo

Con base en la gráfica anterior se obtuvo la ecuación que relaciona las dos relaciones expuestas anteriormente y que permitirá, en conjunción con la ecuación estándar para las soluciones acuosas, definir un par de ecuaciones explícitas para el cálculo de C_4 , así:

$$y = 0,358 \ln(x) - 2,0724 \quad \text{Ecuación 68}$$

Reemplazando

$$\frac{Q_3C_3}{Q_4C_4} = 0,3580 \ln\left(\frac{Q_1C_1}{Q_2C_2}\right) - 2,0724 \quad \text{Ecuación 69}$$

$$Q_3C_3 = Q_4C_4 \left[0,3580 \ln\left(\frac{Q_1C_1}{Q_2C_2}\right) - 2,0724 \right] \quad \text{Ecuación 70}$$

Partiendo de la ecuación estándar para las soluciones acuosas de donde se despeja Q_3C_3 :

$$Q_1C_1 + Q_2C_2 - Q_4C_4 = Q_3C_3 \quad \text{Ecuación 71}$$

Igualando

$$Q_1C_1 + Q_2C_2 - Q_4C_4 = Q_4C_4 \left[0,3580 \ln\left(\frac{Q_1C_1}{Q_2C_2}\right) - 2,0724 \right] \quad \text{Ecuación 72}$$

$$C_4 = \frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2}{Q_4 \left[0,3580 \ln \left(\frac{Q_1 C_1}{Q_2 C_2} \right) - 1,0724 \right]} \quad \text{Ecuación 73}$$

Con lo que se obtiene la ecuación explícita para el cálculo de C_4 a partir de las variables conocidas de entrada, esto es caudales y concentraciones, y caudal de salida sobre la tubería requerida.

De manera similar se realiza para la concentración en C_3 , así:

$$Q_4 C_4 = \frac{Q_3 C_3}{0,3580 \ln \left(\frac{Q_1 C_1}{Q_2 C_2} \right) - 2,0724} \quad \text{Ecuación 74}$$

Y partiendo de la ecuación estándar para las soluciones acuosas, de donde se despeja $Q_4 C_4$:

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 - Q_3 C_3 = Q_4 C_4 \quad \text{Ecuación 75}$$

Igualando se obtiene

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 - Q_3 C_3 = \frac{Q_3 C_3}{0,3580 \ln \left(\frac{Q_1 C_1}{Q_2 C_2} \right) - 2,0724} \quad \text{Ecuación 76}$$

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 = \frac{Q_3 C_3}{0,3580 \ln \left(\frac{Q_1 C_1}{Q_2 C_2} \right) - 2,0724} + Q_3 C_3 \quad \text{Ecuación 77}$$

$$C_3 = \frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2}{Q_3 \left[\frac{1}{0,3580 \ln \left(\frac{Q_1 C_1}{Q_2 C_2} \right) - 2,0724} + 1 \right]} \quad \text{Ecuación 78}$$

Finalmente se realiza una tabla que muestre todas las concentraciones calculadas y la medida, tanto para C_3 , como para C_4 , tal como sigue:

Tabla 17. Cálculo de C4 mediante las ecuaciones estudiadas y la ecuación propuesta, para las pruebas que cumplen las restricciones incluyendo la totalidad de las tomas

Prueba	Toma	Medición	Ho		Gómez		Ec. Estándar		Ec. Propuesta	
		Conc. (g/L)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)
1	1,00	6,40	7,31	14,4%	7,31	14,4%	6,49	1,5%	6,24	-2,4%
	2,00	6,29	7,30	16,0%	7,31	16,1%	6,34	0,8%	6,28	-0,2%
	3,00	6,25	7,28	16,5%	7,29	16,5%	6,30	0,7%	6,24	-0,2%
2	1,00	6,62	7,27	9,7%	7,27	9,7%	6,64	0,2%	6,44	-2,8%
	2,00	6,56	7,24	10,3%	7,24	10,3%	6,56	0,0%	6,43	-2,1%
	3,00	6,54	7,21	10,2%	7,21	10,2%	6,57	0,5%	6,39	-2,3%
3	1,00	6,63	7,04	6,2%	7,04	6,2%	6,58	-0,6%	7,03	6,0%
	2,00	6,63	7,02	5,9%	7,02	5,9%	6,65	0,3%	7,04	6,1%
	3,00	6,61	6,98	5,7%	6,98	5,7%	6,65	0,6%	7,01	6,1%
4	1,00	6,90	7,16	3,7%	7,16	3,7%	6,86	-0,5%	6,67	-3,3%
	2,00	6,88	7,15	4,0%	7,15	4,0%	6,85	-0,4%	6,71	-2,5%
	3,00	6,82	7,08	3,8%	7,08	3,8%	6,66	-2,3%	6,66	-2,3%

Tabla 18. Cálculo de C3 mediante las ecuaciones estudiadas y la ecuación propuesta, para las pruebas que cumplen las restricciones incluyendo la totalidad de las tomas

Prueba	Toma	Medición	Ho		Gómez		Ec. Estándar		Ec. Propuesta	
		Conc. (g/L)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)
1	1,00	0,94	0,15	-83,5%	0,36	-61,5%	1,03	10,0%	1,18	25,5%
	2,00	0,93	0,01	-98,5%	0,01	-98,5%	0,98	5,2%	0,99	6,7%
	3,00	0,97	0,01	-98,6%	0,01	-98,6%	1,01	4,5%	1,02	5,8%
2	1,00	1,26	0,65	-48,5%	0,66	-48,1%	1,28	1,2%	1,46	15,2%
	2,00	1,32	0,65	-50,3%	0,66	-49,8%	1,32	0,0%	1,45	10,4%
	3,00	1,22	0,60	-51,2%	0,60	-51,2%	1,25	2,4%	1,40	14,3%
3	1,00	4,29	3,87	-9,8%	3,90	-9,1%	4,25	-0,9%	3,88	-9,6%
	2,00	4,24	3,90	-8,1%	3,90	-8,1%	4,26	0,4%	3,89	-8,4%
	3,00	4,20	3,88	-7,4%	3,87	-7,7%	4,24	0,9%	3,86	-8,0%
4	1,00	6,33	6,05	-4,3%	6,10	-3,6%	6,29	-0,5%	6,50	2,7%
	2,00	6,32	6,04	-4,4%	6,06	-4,1%	6,29	-0,4%	6,45	2,1%
	3,00	6,34	5,96	-6,0%	6,00	-5,5%	6,20	-2,3%	6,34	0,0%

8 Análisis de los resultados obtenidos

Una vez calculado el valor de las concentraciones de salida, C_3 y C_4 , mediante las ecuaciones de Ho, Romero-Gómez, ecuación de mezcla estándar y la propuesta en el desarrollo del experimento, se parte a comparar los resultados obtenidos con el promedio de los valores medidos con el fin de confirmar que la propuesta metodológica para determinar un ecuación que relacione las concentraciones de salida en función de las variables conocidas se aproxime a los valores obtenidos en las mediciones realizadas sobre el modelo físico del experimento. Dichos resultados se ilustran en las tablas y gráficas siguientes.

Es importante mencionar que en todos los casos las concentraciones en las tuberías 3 y 4 se encontraron dentro del rango definido por las concentraciones en 1 y 2, sin ser en ningún caso las primeras iguales a las segundas, lo que confirma que sea cual sea a configuración del sistema y de los caudales entrantes y salientes del accesorio, en todos los casos ocurre algún grado de dilución y por lo tanto mezcla en alguna proporción.

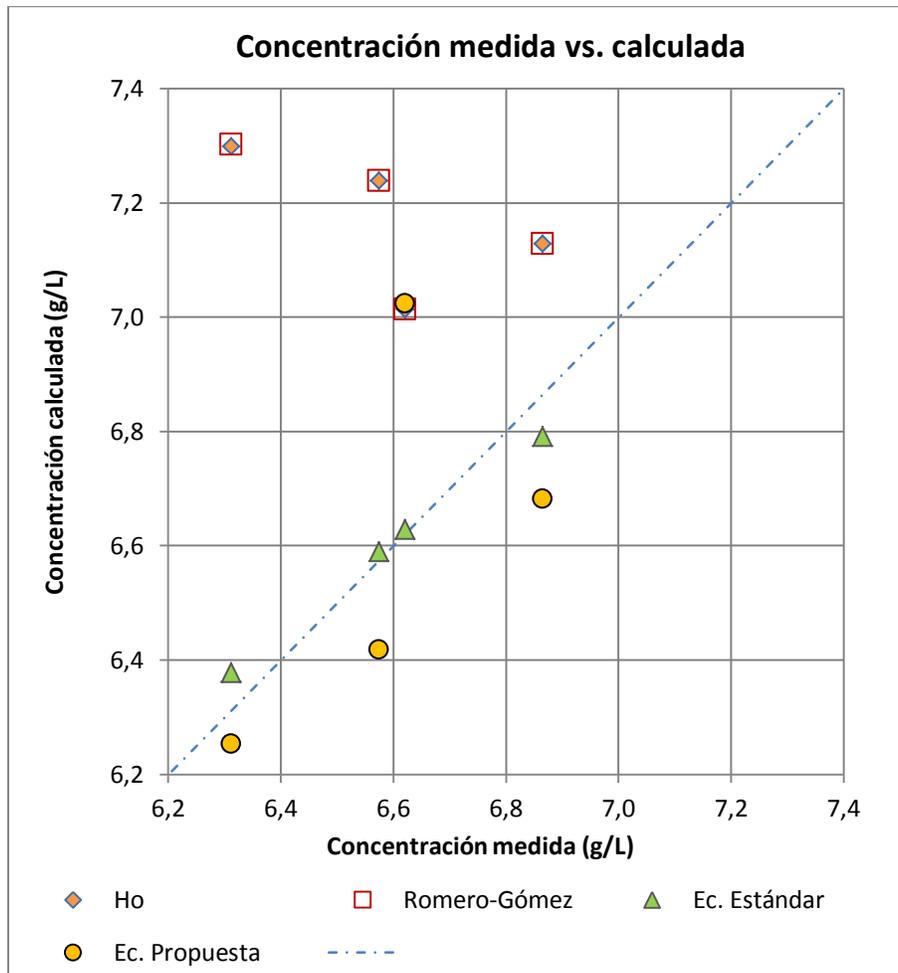
8.1 Resultados obtenidos para la concentración C_4

Para el caso de la concentración C_4 se obtiene los resultados transcritos en la siguiente tabla:

Tabla 19. Cálculo de C_4 mediante las ecuaciones estudiadas y la ecuación propuesta, para las pruebas que cumplen las restricciones. Promedio de las tomas para cada prueba

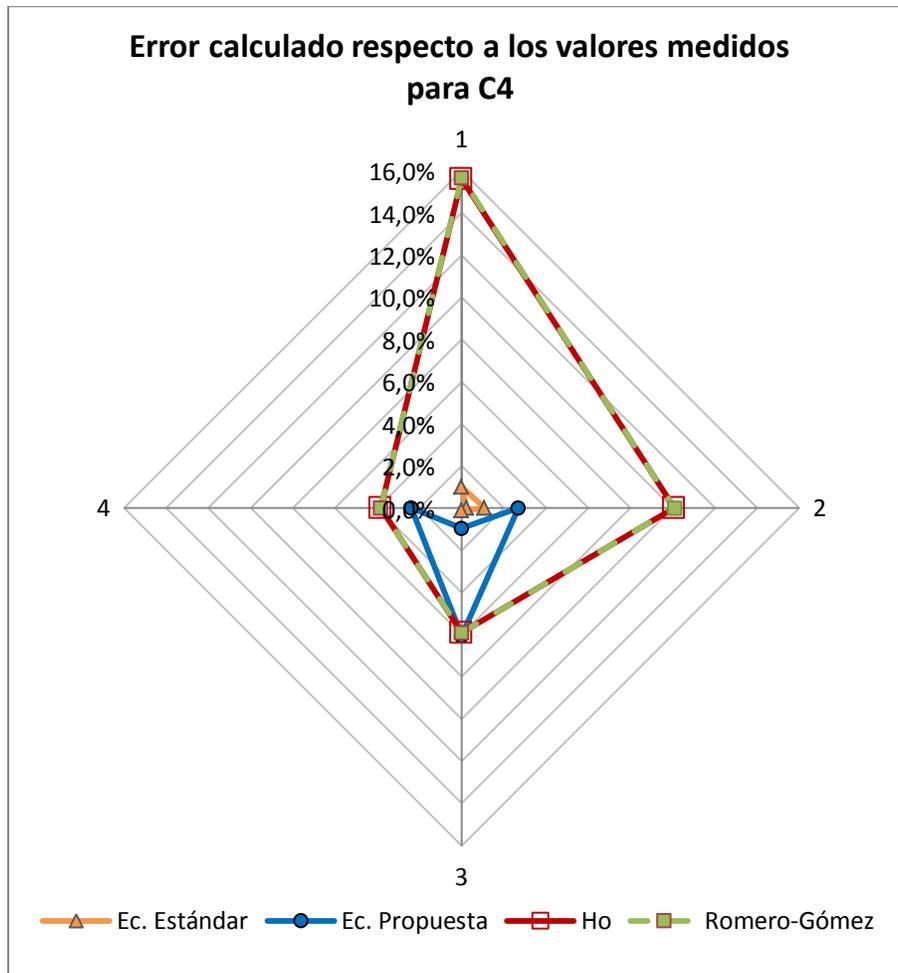
Prueba	Medición	Ho		Romero-Gómez		Ec. Estándar		Ec. Propuesta No. 1	
	Conc. (g/L)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)	Conc. (g/L)	Error (%)
1	6,31	7,30	15,6%	7,30	15,7%	6,38	1,0%	6,25	-1,0%
2	6,57	7,24	10,1%	7,24	10,1%	6,59	0,2%	6,42	-2,4%
3	6,62	7,01	5,9%	7,01	5,9%	6,63	0,1%	7,02	6,1%
4	6,87	7,13	3,8%	7,13	3,8%	6,79	-1,1%	6,68	-2,7%

Con los valores anteriores se elaboró una gráfica de dispersión de datos que permite observar la aproximación de los resultados de cada una de las ecuaciones respecto a los valores medidos, representados por la línea punteada en color azul, tal como se muestra a continuación:



Gráfica 8. Exactitud de las ecuaciones estudiadas en relación a la concentración medida para C4. Pruebas que cumplen con las restricciones del modelo. Promedio de las tomas para cada prueba.

Como se puede observar, la ecuación estándar es de las cuatro evaluadas la que más se ajusta a las mediciones realizadas; sin embargo es importante tener en cuenta que su uso se restringe al conocimiento de las concentraciones de tres de las tuberías que componen la cruz, situación que no es real debido a que en los modelos hidráulicos de redes de distribución de agua a presión las concentraciones de salida son de por sí las incógnitas. Entre las ecuaciones explícitas para el cálculo de C_4 , se puede observar que la propuesta en el presente estudio es la que más se ajusta a los valores medidos, incluso más que las ecuaciones de Ho y Romero-Gómez debido a las diferencias notables en el modelo físico de los experimentos realizados por los diferentes autores, como se comentará más a detalle en las conclusiones.



Gráfica 9. Error calculado para el valor de C4 hallado mediante las diferentes ecuaciones estudiadas respecto a los valores medidos en el experimento. Pruebas que cumplen con las restricciones del modelo.

En la gráfica radial anterior se observa que los valores correspondientes a los errores relativos de cada ecuación respecto a los valores promedio de cada prueba del experimento, que mejor ajuste presentan corresponden a la ecuación de mezcla estándar, y dentro de las ecuaciones explícitas la que más exacta es la ecuación propuesta.

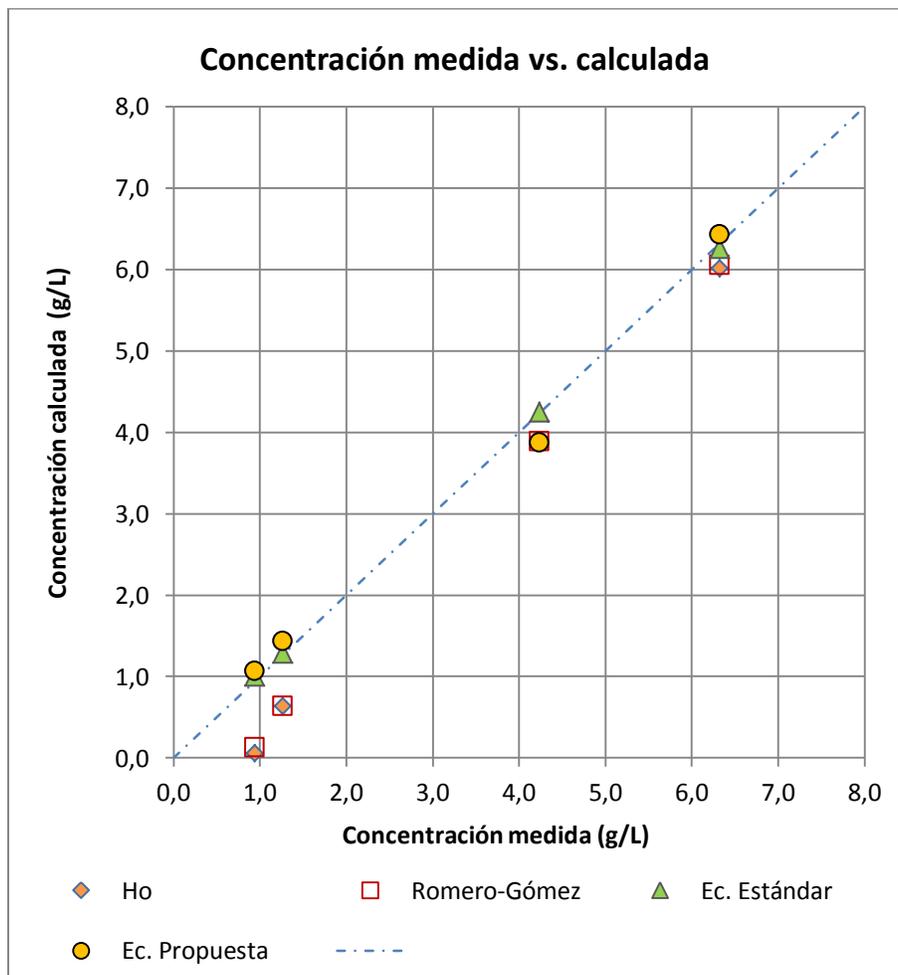
8.2 Resultados obtenidos para la concentración C₃

Para el caso de la concentración C₃ se realizó el mismo procedimiento, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 20. Cálculo de C3 mediante las ecuaciones estudiadas y la ecuación propuesta, para las pruebas que cumplen las restricciones. Promedio de las tomas para cada prueba

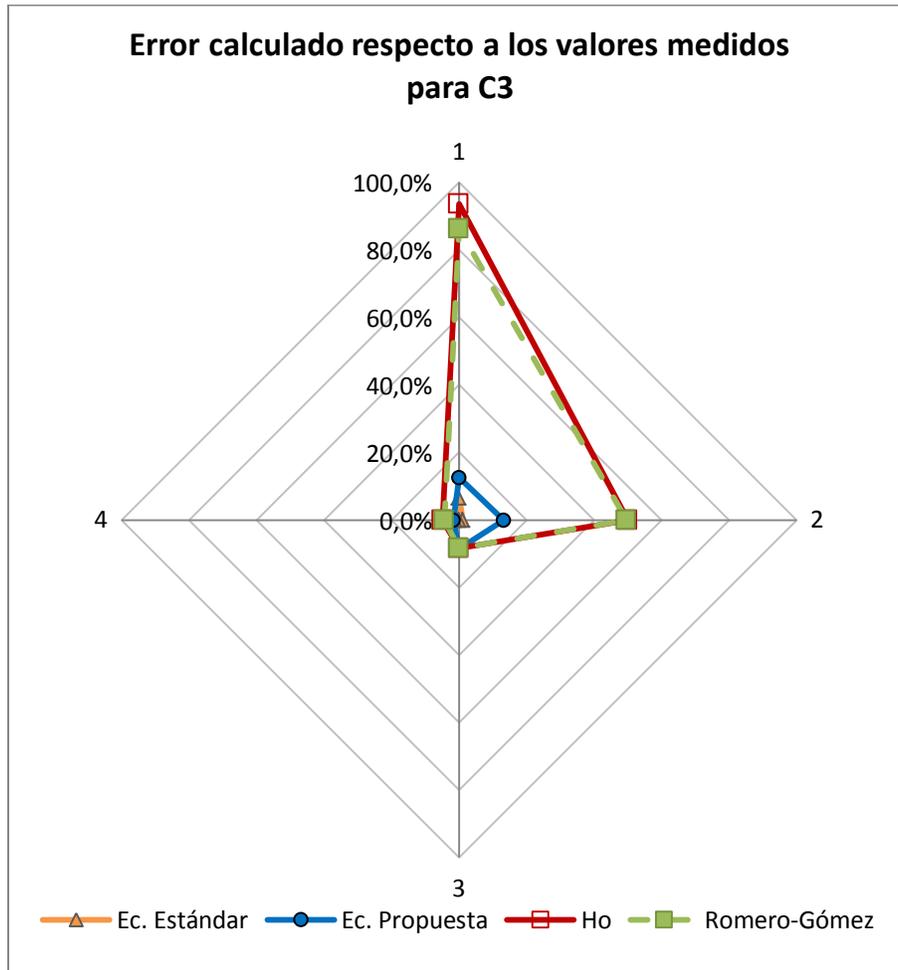
Prueba	Medición	Ho		Gómez		Ec. Estándar		Ec. Propuesta 1	
	Concen. (g/L)	Concen. (g/L)	Error (%)	Concen. (g/L)	Error (%)	Concen. (g/L)	Error (%)	Concen. (g/L)	Error (%)
1	0,95	0,06	-93,6%	0,13	-86,3%	1,01	6,5%	1,06	12,6%
2	1,27	0,63	-50,0%	0,64	-49,7%	1,28	1,1%	1,44	13,3%
3	4,24	3,88	-8,4%	3,89	-8,3%	4,25	0,1%	3,87	-8,7%
4	6,33	6,02	-4,9%	6,05	-4,4%	6,26	-1,1%	6,43	1,6%

Con los valores anteriores se elaboró una gráfica de dispersión de datos que permite observar la aproximación de los resultados de cada una de las ecuaciones respecto a los valores medidos, representados por la línea punteada en color azul, tal como se muestra a continuación:



Gráfica 10. Exactitud de las ecuaciones estudiadas en relación a la concentración medida para C3. Pruebas que cumplen con las restricciones del modelo. Promedio de las tomas para cada muestra

En este caso se puede observar que tal como ocurrió en el caso anterior, la ecuación propuesta muestra un alto nivel de ajuste a las mediciones realizadas en las pruebas del experimento.



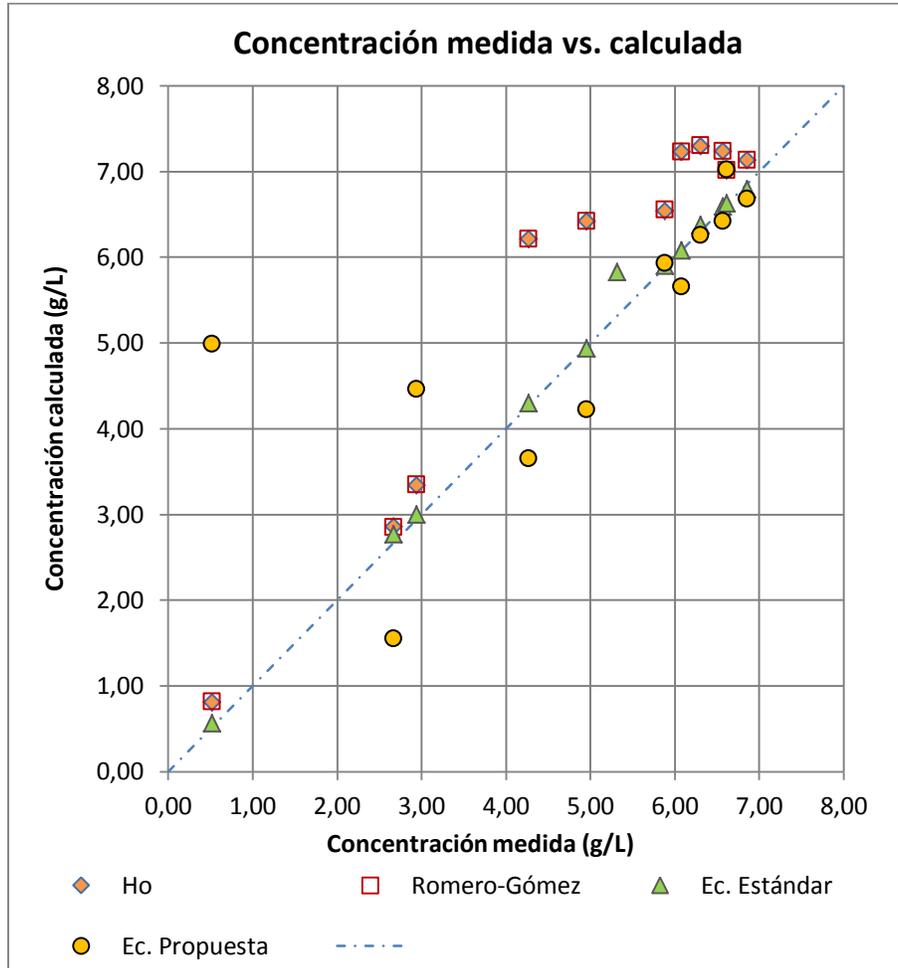
Gráfica 11. Error calculado para el valor de C3 hallado mediante las diferentes ecuaciones estudiadas respecto a los valores medidos en el experimento. Pruebas que cumplen con las restricciones del modelo.

Nuevamente, la gráfica radial en el caso de C3 muestra que después de la ecuación de mezcla estándar, la ecuación más exacta es la propuesta.

8.3 Resultado general C₃ y C₄

Tanto las tablas como los gráficos anteriores corresponden a las pruebas que cumplen a cabalidad las restricciones arriba mencionadas; sin embargo se decidió graficar los resultados de los datos promedio de cada una de las pruebas realizadas y evaluar el ajuste de la ecuación propuesta en los casos en que no se cumplió con alguna de las restricciones propuestas.

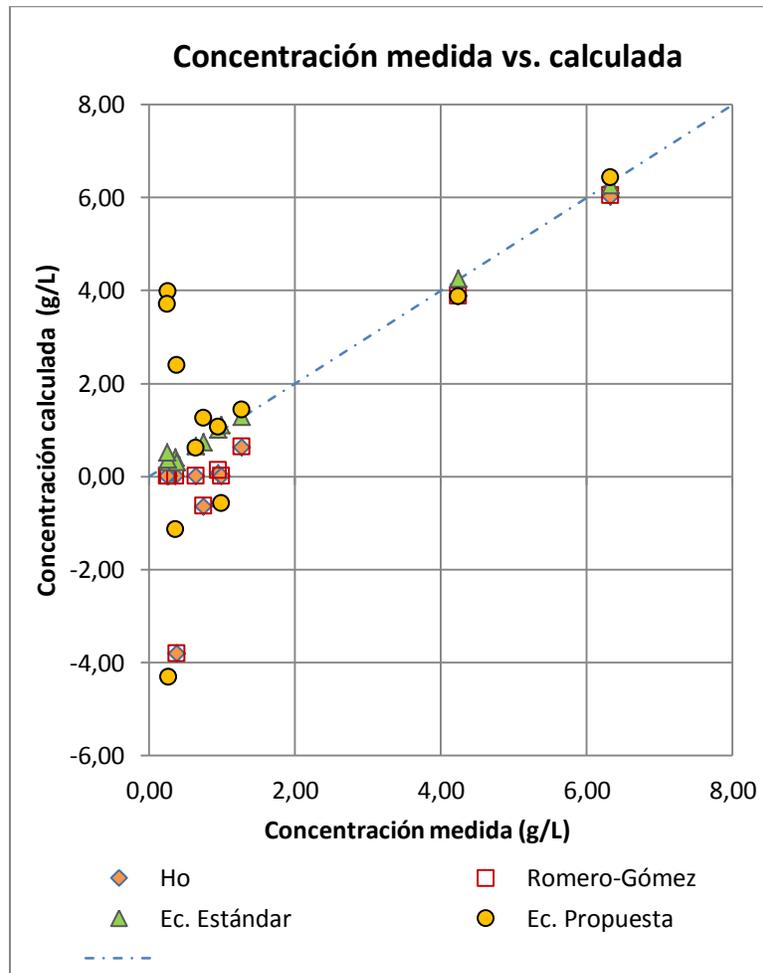
Los resultados obtenidos para C₄ se muestran en la siguiente gráfica:



Gráfica 12. Exactitud de las ecuaciones estudiadas en relación a la concentración medida para C₄. Todas las pruebas.

Como se puede observar, algunos de los valores obtenidos se alejan significativamente de los valores obtenidos durante el experimento. Al hacer un análisis del comportamiento de los resultados se evidenció un error de procedimiento en la toma de los datos respecto al instrumento utilizado para medir la conductividad, situación que se explicará con mayor detalle en las conclusiones del informe.

Para el caso de la concentración C₃ se desarrolló el mismo procedimiento, alcanzando los siguientes resultados:



Gráfica 13. Exactitud de las ecuaciones estudiadas en relación a la concentración medida para C3. Todas las pruebas.

Se observa igualmente mayor dispersión en algunas de las pruebas donde no se cumplen las restricciones, incluso mayores errores porcentuales que en el caso anterior dado que por regla general los valores de la concentración en la tubería 3 son significativamente menores que en la tubería 4, acercándose en algunos de los casos a la conductividad en la tubería 2, la cual era mínima.

9 Conclusiones, recomendaciones y comentarios sobre las conclusiones

Las conclusiones y recomendaciones resultado del experimento se muestran continuación.

9.1 Conclusiones

Realizado el experimento y analizados los elementos que intervinieron en él, así como sus resultados se puede concluir lo siguiente:

- Se confirma que la metodología usada para este experimento con las restricciones planteadas para el mismo, es coherente y brinda resultados óptimos para estimar las concentraciones C_3 y C_4 .
- Para estimar las concentraciones C_3 y C_4 con otras restricciones se hace necesario determinar e incluir en la metodología propuesta nuevas relaciones entre caudales de entrada y salida y sus concentraciones, de manera tal que se pueda hallar otra ecuación que ajuste los resultados reales al modelo.
- Se confirma que efectivamente, para las circunstancias comunes de los sistemas de distribución de agua potable a presión correspondientes a las uniones de tuberías en cruz se cumplen la mayoría de las situaciones el caso 4 tipo b. con la salvedad que las concentraciones son diferentes en todas las tuberías ($C_1 \neq C_2$).
- Se observa que las consideraciones y evaluaciones realizadas por diferentes investigadores donde se supone para el caso 4 tipo a y b, que la concentración C_1 es igual a la C_4 , solo es correcta en condiciones controladas de laboratorio y con cruces sin mayores cambios geométricos en su sección interior y con unas paredes interinas lisas, aunque es posible que para grandes diámetros esta suposición sea una buena aproximación a la realidad.
- Para todo sistema de distribución de agua potable a presión, que tenga en su red uniones de tuberías por medio de cruces, si el valor de las concentraciones de entrada a la cruz, son diferentes, todas las concentraciones de salida también serán diferentes, debido a las características mismas de la unión en cruz que afectan el perfil de velocidad y la cantidad de movimiento de los fluidos que discurren a través de ella, ver comentarios.
- Dado que en una red de distribución de agua potable existen cambios de velocidad y sentido de flujo se puede inferir con base en el experimento, que al existir gran cantidad de estas uniones, las concentraciones en sectores de la red tenderán a igualarse, y en general en toda la red se presentara una mezcla total de las soluciones. Los valores de estas concentraciones variarían en el tiempo debido a la afectación derivada de la reacción de las soluciones con las paredes internas de las tuberías, válvulas y accesorios, de ahí que aunque exista una mezcla total en toda la red el valor de las concentraciones de la solución sea diferente por sectores.
- Dado que para modelar una red de agua potable a presión, se hace necesario determinar unos consumos por nudo que representa en el modelo el consumo de agua por parte de los suscriptores alrededor del mismo, para determinar la concentración del soluto para estos no es acertado estimar la calidad del agua en el nudo, en la medida que las concentraciones de salida por cada tubería (caso tipo 4 b), son diferentes, de manera tal que la concentración por tubería es diferente a la que se estimaría como si se extrajera un cantidad de agua de la cruz (nudo), la concentración de esta salida sería diferente a la correspondiente al usuario dependiendo de la tubería donde tenga su acometida. Todos los usuarios de conectados a

una tubería deben tener asignada la concentración del soluto correspondiente a la misma. Esto se puede realizar haciendo una adaptación al software de modelación hidráulica con base en un SIG, que identifique a usuario con su correspondiente tubería de alimentación.

- Al comparar el modelo digital (EPANET), con el modelo real, se observa en el modelo real que cuando una de las tuberías que discurre el agua hacia la cruz tiene un caudal muy bajo, por ejemplo Q_2 , en comparación con Q_1 , el flujo a través de la unión tipo cruz se asemeja al flujo a través de una tee, lo cual no lo entiende físicamente el programa de EPANET, reportando así caudales iguales a la salida de la cruz, siendo un error ya que en la realidad fluye más agua a través de la salida Q_3 que por la salida Q_4 .
- Se observa que el experimento es muy sensible en la medida de la conductividad, por el uso de instrumentos no adecuados y con rangos de medida de la conductividad extremos a los preparados para el experimento.

9.2 Recomendaciones

- Para desarrollar un método de cálculo robusto de las concentraciones de salida, se debe desarrollar más experimentos con diferentes diámetros de tuberías, caudales de entrada y salida en cada tubería, diferentes tipos de uniones en cruz.
- Para mejorar la toma de datos es imprescindible la compra de instrumentos que evalúen los valores de las variables en tiempo real, calibrados y con los rangos ajustados a las medidas que se planteen en el experimento. No se debe realizar el experimento con valores extremos de conductividad, lo ideal es que los valores de la conductividad de las soluciones preparadas estén muy cerca del valor óptimo de medida del instrumento utilizado, por ejemplo si el valor de medida óptimo del instrumento de conductividad es de 12 mS, lo recomendable es que una de las concentraciones este alrededor de 14 mS y la otra alrededor de los 10 mS, de tal manera que sus mezclas estén cercanas al valor óptimo de medida del equipo.
- Para mejores resultados se debe desarrollar un experimento con modelos más complejos que simulen una red de distribución de agua y evaluar en varios nudos al tiempo el comportamiento de los caudales y las concentraciones
- Verificar los modelos de Redes, Epanet y WaterCad.

9.3 Comentarios

Adjunto con las conclusiones y recomendaciones, resultado del experimento aparecen algunos temas que deben ser comentados pero que no hacen parte de las dos anteriores, para este caso ellos son:

9.3.1 Mezclas reales dentro de las uniones en cruz

Aunque pruebas en laboratorio y modelos desarrollados en software de modelación de fluidos hacen suponer que para el caso 4 (tipo a y b), la concentración C_1 es igual a la concentración C_4 , en la realidad las redes de distribución de agua potable cuentan con uniones de tipo cruz que se alejan significativamente de las usadas comúnmente en los prototipos físicos de laboratorio (acrílico o vidrio), lo que hace que la suposición que C_1 es igual a la concentración C_4 , es meramente académica, aunque eficiente para entender de manera general el fenómeno y brindar explicaciones al respecto y aproximaciones matemáticas útiles.

Algunas de las razones por las cuales afirmar que la concentración C_1 es igual a la concentración C_4 , no es cierta en redes de distribución de agua potable a presión se comentan a continuación.

9.3.1.1 Características de las uniones en cruz

Las uniones en cruz tienen una serie de características que afectan la cantidad de movimiento de los fluidos que discurren a través de ella, generando pequeñas turbulencias que hacen que exista mezcla de las aguas convergentes en el interior de la misma.

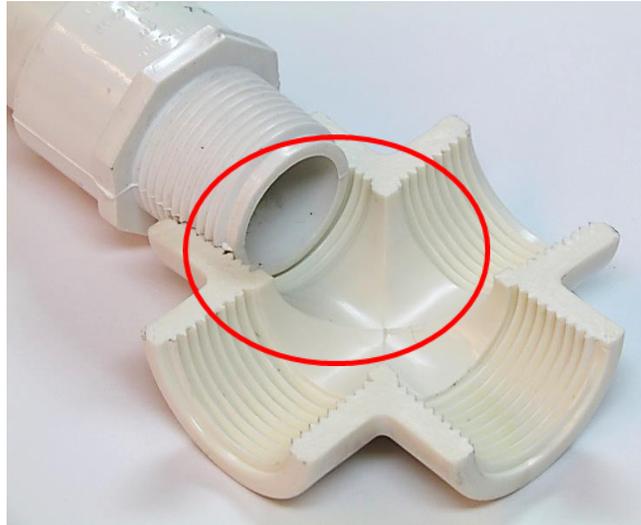
9.3.1.1.1 Consideraciones geométricas por procesos de fabricación.

Dentro de las consideraciones a tener en cuenta están las características de configuración geométrica derivadas de los procesos de fabricación de la unión, tal como se muestra en la foto siguiente; se observa la sección transversal de la unión cruz usada en el experimento (PVC), tiene las huellas de los machos contenidos en el molde de inyección, que sirven para configurar la parte interna de la unión. La altura de las huellas de estos machos se midió con un pie de rey y es de 0,5 mm.



Fotografía 15. Imperfecciones derivadas del proceso de fabricación (cruz PVC soldada)

De igual manera para uniones en cruz fabricadas en PVC, pero con conexión roscada NPT, tal como se observa en la siguiente fotografía, se distinguen zonas con rugosidades (rebabas), debidas a los machos de fabricación y al sistema de conexión.



Fotografía 16. Imperfecciones derivadas del proceso de fabricación (cruz PVC roscada)

Para el caso de otros tipos de procesos de fabricación como el de las cruces de Acero Galvanizado se puede observar una cavidad propia del macho que conforma la parte interna de la unión en el proceso de fundición del metal, esta cavidad fue medida obteniendo una altura de la parte más baja al filete de la rosca de 2 mm



Fotografía 17. Imperfecciones derivadas del proceso de fabricación (cruz hierro galvanizado roscada)

De igual manera ocurre con otro tipo de uniones en cruz usada en los sistemas de distribución de agua, como las fabricadas en hierro dúctil donde también necesita de machos de arena para conformar la parte interna de la cruz, generando saltos o diferencias concéntricas en la cruz derivados de la fuerza de desplazamiento del hierro fundido a través del molde de arena. Esta diferencia disminuye de manera relativa al diámetro interno de la tubería a usar; así a mayor diámetro interno menor es esta diferencia de altura relativa al mismo.

9.3.1.1.2 Consideraciones del método de unión

Otra consideración a tener en cuenta es la correspondiente al método de unión en la cruz. Para el caso de esta unión en PVC, la unión se realiza a través de pegamento para PVC (Soldadura solvente); esto implica que el material en contacto entre el tubo y la cruz, se derrite y se mezcla para luego secarse y hacerse una sola pieza. Esto implica que el diámetro exterior de la tubería

debe ingresar dentro de la unión, generando dentro de la cruz un escalón que corresponde en altura casi al espesor mismo del tubo que se une, tal como se observa en la foto anterior.

Para el caso de la tubería de Acero Galvanizado, la conexión es roscada de tipo cónico que hace sello a través de los filetes de la rosca, por tanto y como aparece en la foto la rosca del tubo no entra plenamente dentro de la cruz, por tanto al fluir el agua hacia adentro de la cruz esta choca con los filetes de la rosca generando turbulencias que interrumpen el discurrir uniforme del agua.

Otros tipos de conexiones en uniones de cruz, son las bridadas o las conexiones hidráulicas; en ambos casos la unión genera saltos internos dentro de la cruz que perturba el discurrir del flujo hacia el centro de la cruz.

9.3.1.1.3 Consideraciones al respecto del material de fabricación

Otro aspecto importante es el material con el cual se fabrica la unión. Así por ejemplo, para el caso del PVC es un material con una rugosidad muy baja y sin afectación por corrosión metálica y solo afectado en parte por la biocorrosión. Para el caso del Acero Galvanizado, este es un material con una rugosidad alta, que se afecta por corrosión metálica y biocorrosión. Para el caso del hierro dúctil, aunque este tipo de unión está recubierto por una pintura epóxica que disminuye la rugosidad del material en contacto con el agua, esta sigue siendo mayor a la del PVC y susceptible de desgastarse y permitir la formación de corrosión metálica y en todo caso biocorrosión.

9.3.2 Aplicación computacional del modelo planteado

Todo experimento tiene como objetivo conocer más de aquello sobre lo que se experimenta y como fin último aplicar lo conocido a situaciones prácticas de la vida, la sociedad o la industria de todo tipo, y este experimento la metodología aquí propuesta y sus resultados no se alejan de este fin.

La aplicación práctica de lo aquí desarrollado es llevarlo a un modelo computacional que con bastante exactitud permita modelar el flujo de agua con su concentración a través de la red de distribución de agua modelada y predecir el valor de la concentración del agua de manera espacial y temporal en la red.

A continuación se muestra el diagrama de flujo propuesto para determinar el valor de salida de las concentraciones de agua que discurre a través de un nudo en un modelo hidráulico, donde se conocen los caudales de entrada y salida (cuatro en total), y al menos dos de las cuatro concentraciones que discurren hacia el nudo.

El diagrama propone que conocido los caudales de entrada y salida de cada nudo y conocidas dos de las concentraciones que ingresan a él, determinar el valor de las concentraciones de salida de manera eficiente y exacta, evaluando las características de los caudales que confluyen a la unión. El método propone evaluar qué caso de caudales que confluyen en la cruz, de los aquí descritos en este documento ocurre en el nudo del modelo y con base en esto continuar con el diagrama de flujo y determinar el valor de las concentraciones a través de las diferentes ecuaciones propuestas.

Para determinar si los caudales que confluyen al nudo son de entrada o salida se toma como base la información suministrada por el software de modelación hidráulica que se toma como base el cual debe tener la posibilidad de a través de una aplicación de GIS (o de manera propia del sistema a través de un sistema cartesiano propio que ubique espacialmente los nudos dentro de una foto satelital o de otro tipo), ubicar los nudos en coordenadas (x,y) o latitud (Norte y Sur) y longitud (Este y Oeste), de tal manera que pueda determinar a través de un algoritmo si la entrada de una tubería a la cruz en comparación a otra, es adyacente o está enfrentada, tal como se muestra en la figura siguiente.

El algoritmo deberá evaluar si el punto de origen del tubo está en las zona correspondiente al norte (N), al sur (S), al este (E) u oeste (W); estas zonas están delimitadas por líneas imaginarias trazadas desde el nudo en dirección (NE), (NW), (SW) y (SE), así una tubería cuyo punto de origen en dirección al nudo en estudio (las coordenadas del nudo son el punto de llegada de la tubería), está ubicada en coordenadas que la ubique en la zona comprendida entre las líneas (NE) y (NW), será adyacente a una tubería cuyas coordenadas de origen este ubicadas en la zona delimitada por la líneas imaginarias (NE) y (SE) o (NW) y (SW). Un algoritmo similar es posible realizarlo para sistemas coordenados, tal como lo utiliza EPANET, haciendo por ejemplo $f(x) = x$, y $f(x) = -x$, desarrollando desigualdades para la ubicación de los puntos de origen y llegada de las tuberías y determinando las áreas de influencia.

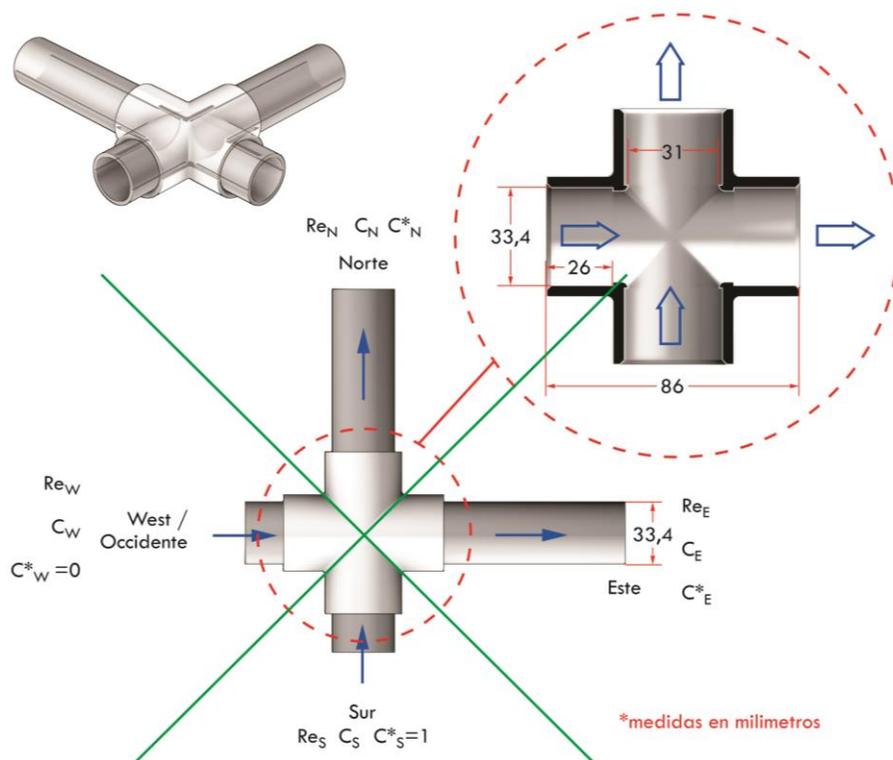


Figura 17. Identificación de las tuberías de entrada y salida de acuerdo con una base georreferenciada

Para el caso 4 tipo b. es necesario complementar el método de cálculo con una o varias ecuaciones que cubran todas las posibilidades de relaciones y restricciones de los caudales de entrada y salida con sus correspondientes concentraciones y agregarlas a esta parte del diagrama de flujo propuesto. Para el caso aquí evaluado, se agregaron las relaciones y restricciones que hacen parte de este documento y su correspondiente ecuación para la valoración de las concentraciones de salida. Este diagrama de flujo debe conllevar al desarrollo de un algoritmo lo suficientemente robusto para ser incorporado en un software de modelación hidráulica convencional y determinar con mayor exactitud el valor de las concentraciones salientes de los nudos de estudio.

El diagrama de flujo desarrollado para este caso particular se muestra a continuación.

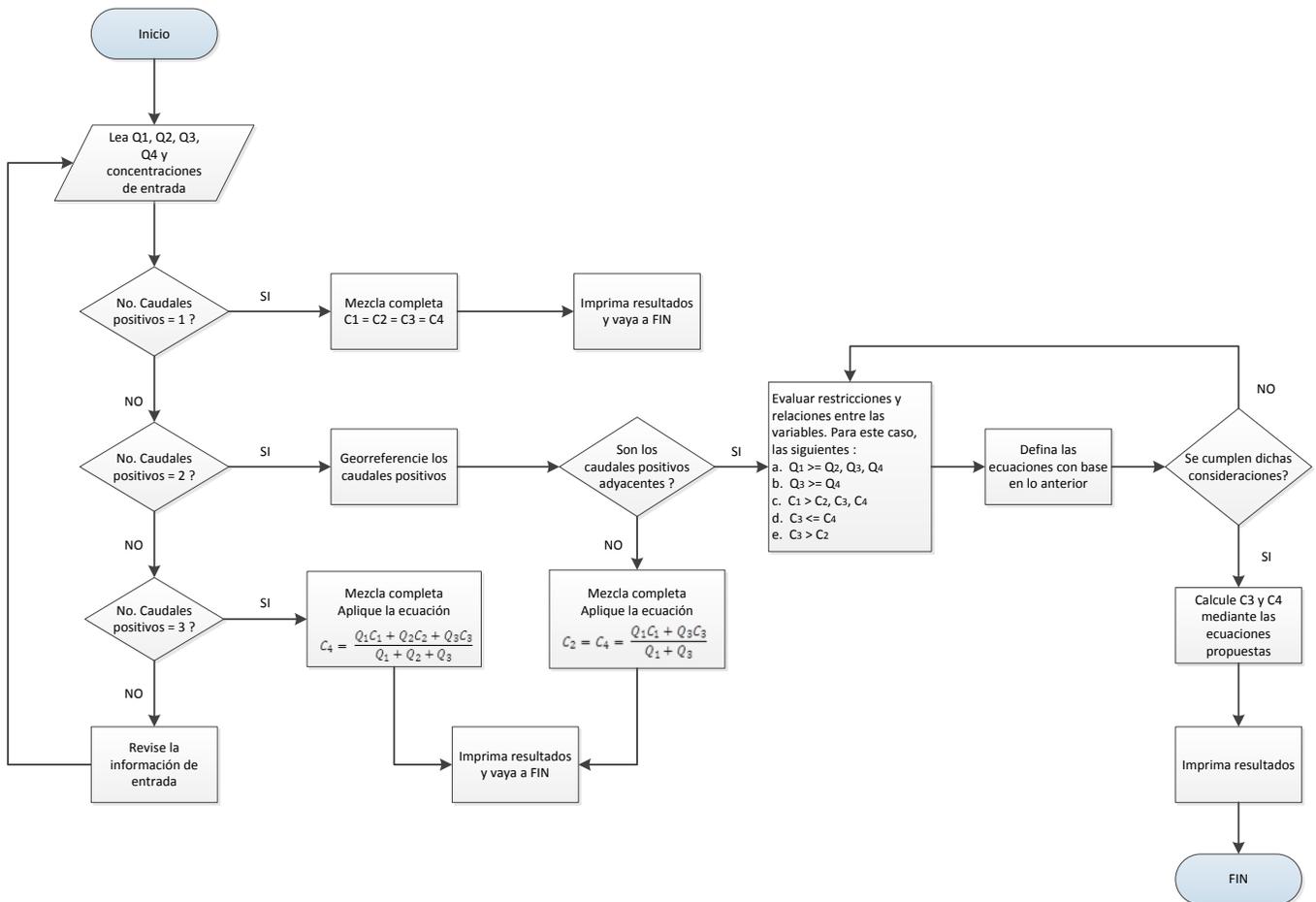


Figura 18. Diagrama de flujo propuesto para la aplicación computacional del modelo planteado con base en un posicionamiento georreferenciado



10 Bibliografía

10.1 Artículos y otros documentos

- Cabrera, M. E. & Espert, A. V. (2005). Análisis de la evolución de la calidad del agua en redes. Modelación matemática de redes. Formación ITA. Memorias de curso, Tomo 1. UPV.
- Chiu, C. L., & Hsu, S. M. (2006). Probabilistic approach to modeling of velocity distributions in fluid flows. *Journal of Hydrology*, Vol 316, 119-149.
- Chiu, C. -L., Lin, G. F., & Lu, G. F. (1993). Application of probability and entropy concepts in pipe flow study. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 119, 742 - 756.
- Fuentes, M. O & Mompremier, R. (2012). Resultados de pruebas de laboratorio para analizar la difusión del Cloro en cruces de tuberías. Recuperado el 10 de Septiembre de 2013, de XXII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Acapulco, México, memorias: http://www.revistatlaloc.org.mx/amh_congreso/articulos/InfraestructuraParaAbastecimientoYSaneamientoDelAgua/182Art_fmoa_6.pdf
- García, C. V.& García-Serra, J. (2005). Modelación matemática de redes. Formación ITA. Memorias de curso, Tomo 1. UPV.
- Grayman, W., Clarck, R., & Males, R. (1988). Modeling Distribution System Quality Dynamic Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol 114, 295 - 312.
- Hernández, O. (2005). Metodología del gradiente para la solución de redes de tuberías a presión. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería*, Vol. 59, Pag 16 a 23.
- Ho, C. K. (2008). Solute Mixing Model for Water-Distribution Pipe Networks. Recuperado el 10 de Marzo de 2013, de ASCE: <http://gsgc.gzhu.edu.cn/gpsgd/UploadFile/200942623229730.pdf>
- Ho, C. K., Choi, C. Y., & McKenna, S. A. (2007). Evaluation of complete and incomplete mixing models in water distribution pipe network simulations. Recuperado el 3 de Junio de 2013, de World Environmental and Water Resources congress (ASCE): <http://ascelibrary.org.biblioteca.uniandes.edu.co:8080/doi/abs/10.1061/40927%28243%29486?prevSearch=%28evaluation+of+complete+and+incomplete+mixing+models%29+and+%5BFulltext%3A+evaluation+of+complete+and+incomplete+mixing+models%5D&searchHistoryKey=>
- Liou, C., & Kroon, J. R. (1987). Modelling the Propagation of Waterborne Substances in Distribution Networks. *Journal of American Water Works Association*, Vol 119, 54 - 58.
- Rossman, L., & Boulos, P. (1993). Discrete Volume Element Method for Network Water Quality Models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, 505-515.
- Rossman, L., & Boulos, P. (1996). Numerical methods for modelling water quality in distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol 122, 137 - 146.
- Taylor, G. (1954). The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. *Proceedings of the London Mathematical Society*, Series A, 446-463.



- Todini, E., & Pilati, S. (1987). A gradient method for the analysis of pipe networks. International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic .
- Vidal, R., Martínez, F., & Ayza, M. (1994). Aplicaciones de los modelos de calidad en la simulación de las redes de distribución de agua potable. Ingeniería del Agua, 55 - 68.

10.2 Tesis

- Felix, Z. (2005). Verificación experimental de la aplicabilidad de un modelo simplificado de transporte de solutos en tuberías. Tesis para optar título de maestría, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia.
- Fonnegra, J. C. (2002). Modelo de Calidad del Agua en Sistemas de Distribución de Agua Potable. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia.
- Hernández F. M. A. (2010). Verificación Experimental de la Capacidad Predictiva de Modelos de Transporte de Solutos en Redes de Tuberías a Presión. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- González, M. (2004). Modelo de contaminantes en la red de distribución de agua potable en la ciudad de Bogotá y sus efectos en la población. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
- Guevara, G. (2002). Desarrollo de un modelo simplificado de transporte de solutos en redes de distribución de agua potable. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia.
- Mompremier, R. (2009). Difusión de sustancias en redes de tuberías a presión. Tesis de Maestría en Ciencias en Hidráulica. Instituto Politécnico Nacional. México, México.
- Palacios, W., & Rincón, F. (2008). Red experimental de flujo a presión para el estudio de la hidráulica y transporte de solutos. Tesis de grado en Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá, Colombia.
- Pantoja, C. A. (2005). Verificación Experimental de un modelo transporte de solutos en sistemas de distribución de agua potable. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia.
- Trujillo López, J. A. (2007). Diseño e implementación de una red experimental de flujo a presión para el estudio de la hidráulica y el transporte de solutos. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá, Colombia.

ANEXO No. 1 Datos obtenidos en el experimento

Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,050	0,045	0,045	0,047
Temperatura (°T)	16,90	17,00	16,80	16,900

Tanque No 2				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,050	0,045	0,045	0,047
Temperatura (°T)	17,00	16,90	16,90	16,933

Prueba No. 1 - Toma No. 1	
Contenido sal	2 Kg

Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,88	11,88	11,88	11,880
Temperatura (°T)	16,70	16,70	16,70	16,700

Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,80	1,82	1,82	1,813
Temperatura (°T)	16,70	16,80	16,80	16,767

Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,55	10,54	10,56	10,550
Temperatura (°T)	16,70	16,70	16,80	16,733

Prueba No. 1 - Toma No. 2
Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,80	11,78	11,80	11,793
Temperatura (°T)	17,10	16,80	16,80	16,900

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,79	1,80	1,80	1,797
Temperatura (°T)	17,00	17,00	17,00	17,000

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,40	10,40	10,39	10,397
Temperatura (°T)	17,00	16,90	16,80	16,900

Prueba No. 1 - Toma No. 3
Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,66	11,67	11,67	11,667
Temperatura (°T)	16,70	16,70	16,70	16,700

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,86	1,86	1,86	1,860
Temperatura (°T)	16,60	16,70	16,70	16,667

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,32	10,34	10,36	10,340
Temperatura (°T)	16,90	16,80	16,80	16,833

Prueba No. 2 - Toma No. 1				
Condición:		Válvula 2 cerrada 22,5°		
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,82	11,82	11,79	11,810
Temperatura (°T)	15,40	15,20	15,10	15,233
Tanque No 2				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,04	0,04	0,04	0,040
Temperatura (°T)	15,30	15,20	15,20	15,233
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	2,40	2,40	2,40	2,400
Temperatura (°T)	15,60	15,60	15,60	15,600
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,88	10,88	10,88	10,880
Temperatura (°T)	15,70	15,70	15,70	15,700
Prueba No. 2 - Toma No. 2				
Condición:		Válvula 2 cerrada 22,5°		
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,79	11,77	11,77	11,777
Temperatura (°T)	15,50	15,30	15,30	15,367
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	2,50	2,49	2,49	2,493
Temperatura (°T)	16,00	15,80	15,80	15,867
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,80	10,80	10,79	10,797
Temperatura (°T)	15,70	15,60	15,70	15,667

Prueba No. 2 - Toma No. 3
Condición: Válvula 2 cerrada 22,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,73	11,72	11,73	11,727
Temperatura (°T)	15,70	15,50	15,40	15,533

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	2,34	2,33	2,32	2,330
Temperatura (°T)	16,20	15,90	16,00	16,033

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,76	10,76	10,75	10,757
Temperatura (°T)	15,70	15,70	15,70	15,700

Prueba No. 3 - Toma No. 1
Condición: Válvula 2 cerrada 45°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,48	11,48	11,48	11,480
Temperatura (°T)	16,40	16,50	16,50	16,467

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	7,38	7,39	7,40	7,390
Temperatura (°T)	16,80	16,80	16,80	16,800

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,88	10,89	10,89	10,887
Temperatura (°T)	16,70	16,70	16,70	16,700

Prueba No. 3 - Toma No. 2
Condición: Válvula 2 cerrada 45°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,46	11,46	11,46	11,460
Temperatura (°T)	16,70	16,60	16,70	16,667

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	7,32	7,32	7,32	7,320
Temperatura (°T)	16,70	16,60	16,70	16,667

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,89	10,90	10,90	10,897
Temperatura (°T)	16,70	16,70	16,70	16,700

Prueba No. 3 - Toma No. 3
Condición: Válvula 2 cerrada 45°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,39	11,41	11,41	11,403
Temperatura (°T)	16,50	16,70	16,70	16,633

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	7,25	7,25	7,25	7,250
Temperatura (°T)	16,30	16,40	16,40	16,367

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,86	10,86	10,85	10,857
Temperatura (°T)	16,40	16,40	16,40	16,400

Prueba No. 4 - Toma No. 1
Condición: Válvula 2 cerrada 67,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,65	11,65	11,66	11,653
Temperatura (°T)	15,70	15,70	15,60	15,667

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,45	10,44	10,45	10,447
Temperatura (°T)	16,30	16,10	16,30	16,233

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,28	11,28	11,28	11,280
Temperatura (°T)	16,30	16,20	16,10	16,200

Prueba No. 4 - Toma No. 2
Condición: Válvula 2 cerrada 67,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,65	11,65	11,64	11,647
Temperatura (°T)	15,90	15,90	15,80	15,867

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,44	10,43	10,43	10,433
Temperatura (°T)	16,30	16,40	16,50	16,400

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,24	11,25	11,26	11,250
Temperatura (°T)	16,40	16,30	16,40	16,367

Prueba No. 4 - Toma No. 3
Condición: Válvula 2 cerrada 67,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,54	11,54	11,54	11,540
Temperatura (°T)	16,00	16,00	16,00	16,000

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,48	10,47	10,47	10,473
Temperatura (°T)	16,60	16,50	16,60	16,567

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,17	11,17	11,17	11,170
Temperatura (°T)	16,40	16,40	16,40	16,400

Prueba No. 5 - Toma No. 1
Condición: Válvula 2 cerrada 67,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,78	11,77	11,77	11,773
Temperatura (°T)	16,50	16,40	16,40	16,433

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,26	1,25	1,25	1,253
Temperatura (°T)	17,20	17,20	17,20	17,200

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	9,84	9,84	9,84	9,840
Temperatura (°T)	16,90	17,00	17,00	16,967

Prueba No. 5 - Toma No. 2
Condición: Válvula 2 cerrada 67,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,66	11,66	11,65	11,657
Temperatura (°T)	16,90	16,80	16,80	16,833

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,27	1,26	1,27	1,267
Temperatura (°T)	17,80	17,70	17,70	17,733

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	9,83	9,83	9,83	9,830
Temperatura (°T)	17,50	17,40	17,50	17,467

Prueba No. 5 - Toma No. 3
Condición: Válvula 2 cerrada 67,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,53	11,52	11,52	11,523
Temperatura (°T)	16,80	16,80	16,80	16,800

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,27	1,27	1,27	1,270
Temperatura (°T)	17,60	17,50	17,50	17,533

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	9,74	9,73	9,73	9,733
Temperatura (°T)	17,50	17,30	17,40	17,400

Prueba No. 6 - Toma No. 1				
Condición:	Válvula 1 cerrada 45°			
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,40	11,40	11,39	11,397
Temperatura (°T)	17,40	17,30	16,80	17,167
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,71	0,71	0,71	0,710
Temperatura (°T)	17,90	18,00	18,00	17,967
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	5,30	5,30	5,30	5,300
Temperatura (°T)	18,10	18,20	18,20	18,167

Prueba No. 6 - Toma No. 2				
Condición:	Válvula 1 cerrada 45°			
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,42	11,41	11,40	11,410
Temperatura (°T)	17,50	17,30	17,50	17,433
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,74	0,74	0,74	0,740
Temperatura (°T)	18,40	18,40	18,40	18,400
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	5,26	5,26	5,26	5,260
Temperatura (°T)	18,30	18,30	18,30	18,300

Prueba No. 6 - Toma No. 3				
Condición:	Válvula 1 cerrada 45°			
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,42	11,41	11,41	11,413
Temperatura (°T)	17,50	17,40	17,40	17,433
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,73	0,73	0,73	0,730
Temperatura (°T)	18,40	18,30	18,30	18,333
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	5,25	5,25	5,24	5,247
Temperatura (°T)	18,10	18,00	18,10	18,067

Prueba No. 7 - Toma No. 1				
Condición:	Válvula 1 cerrada 67,5°			
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,42	11,42	11,41	11,417
Temperatura (°T)	17,50	17,40	17,50	17,467
Tanque No 2				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Temperatura (°T)	17,90	17,90	18,00	17,933
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,56	0,56	0,56	0,560
Temperatura (°T)	18,40	18,40	18,40	18,400
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,00	1,00	0,99	0,997
Temperatura (°T)	18,50	18,50	18,50	18,500

Prueba No. 7 - Toma No. 2
Condición: Válvula 1 cerrada 67,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,43	11,43	11,41	11,423
Temperatura (°T)	17,50	17,50	17,40	17,467

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,55	0,55	0,545	0,548
Temperatura (°T)	18,40	18,30	18,30	18,333

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,04	1,04	1,04	1,040
Temperatura (°T)	18,40	18,40	18,40	18,400

Prueba No. 7 - Toma No. 3
Condición: Válvula 1 cerrada 67,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,44	11,44	11,43	11,437
Temperatura (°T)	17,60	17,60	17,60	17,600

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,54	0,54	0,54	0,540
Temperatura (°T)	18,30	18,20	18,20	18,233

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,08	1,08	1,08	1,080
Temperatura (°T)	18,30	18,40	18,30	18,333

Prueba No. 8 - Toma No. 1
Condición: Válvula 1 cerrada 22,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,75	11,76	11,76	11,757
Temperatura (°T)	17,70	17,80	17,80	17,767

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,31	1,30	1,30	1,303
Temperatura (°T)	18,20	18,10	18,10	18,133

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,09	10,10	10,10	10,097
Temperatura (°T)	17,90	17,90	17,80	17,867

Prueba No. 8 - Toma No. 2
Condición: Válvula 1 cerrada 22,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,77	11,77	11,76	11,767
Temperatura (°T)	17,40	17,50	17,50	17,467

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,47	1,47	1,47	1,470
Temperatura (°T)	17,80	17,80	17,80	17,800

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	9,99	10,00	9,99	9,993
Temperatura (°T)	17,60	17,70	17,80	17,700

Prueba No. 8 - Toma No. 3				
Condición:	Válvula 1 cerrada 22,5°			
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,73	11,74	11,74	11,737
Temperatura (°T)	17,70	17,70	17,50	17,633
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,59	1,58	1,58	1,583
Temperatura (°T)	18,40	18,20	18,10	18,233
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	10,20	10,21	10,21	10,207
Temperatura (°T)	17,80	17,90	17,70	17,800

Prueba No. 9 - Toma No. 1				
Condición:	Válvula 1 cerrada 45°			
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,75	11,75	11,75	11,750
Temperatura (°T)	17,10	17,20	17,10	17,133
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,82	0,82	0,82	0,820
Temperatura (°T)	17,30	17,30	17,30	17,300
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	8,56	8,56	8,56	8,560
Temperatura (°T)	17,20	17,20	17,20	17,200

Prueba No. 9 - Toma No. 2
Condición: Válvula 1 cerrada 45°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,70	11,70	11,70	11,700
Temperatura (°T)	17,30	17,30	17,40	17,333

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,67	0,68	0,68	0,677
Temperatura (°T)	17,80	17,80	17,80	17,800

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	8,00	8,00	8,00	8,000
Temperatura (°T)	17,70	17,70	17,60	17,667

Prueba No. 9 - Toma No. 3
Condición: Válvula 1 cerrada 45°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,72	11,73	11,73	11,727
Temperatura (°T)	17,30	17,20	17,30	17,267

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,80	0,80	0,80	0,800
Temperatura (°T)	17,80	17,70	17,70	17,733

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	8,68	8,68	8,68	8,680
Temperatura (°T)	17,40	17,40	17,40	17,400

Prueba No. 10 - Toma No. 1				
Condición:	Válvula 1 cerrada 67,5°			
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,84	11,84	11,85	11,843
Temperatura (°T)	17,20	17,10	17,20	17,167
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,42	0,42	0,42	0,420
Temperatura (°T)	17,20	17,20	17,20	17,200
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	6,89	6,89	6,90	6,893
Temperatura (°T)	17,20	17,20	17,20	17,200

Prueba No. 10 - Toma No. 2				
Condición:	Válvula 1 cerrada 67,5°			
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,83	11,84	11,84	11,837
Temperatura (°T)	17,10	17,10	17,10	17,100
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,53	0,53	0,53	0,530
Temperatura (°T)	17,20	17,20	17,20	17,200
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	7,80	7,80	7,80	7,800
Temperatura (°T)	17,20	17,20	17,20	17,200

Prueba No. 10 - Toma No. 3
Condición: Válvula 1 cerrada 67,5°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,81	11,81	11,81	11,810
Temperatura (°T)	17,10	17,10	17,10	17,100

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,62	0,62	0,62	0,620
Temperatura (°T)	17,10	17,10	17,10	17,100

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	7,40	7,41	7,41	7,407
Temperatura (°T)	17,10	17,10	17,10	17,100

Prueba No. 11 - Toma No. 1
Condición: Válvula 1 cerrada 45° - Válvula 4 cerrada 45°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,24	11,24	11,24	11,240
Temperatura (°T)	16,90	17,00	17,00	16,967

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,91	1,91	1,91	1,910
Temperatura (°T)	16,90	17,00	17,00	16,967

Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	8,83	8,84	8,82	8,830
Temperatura (°T)	16,80	16,80	16,70	16,767

Prueba No. 11 - Toma No. 2				
Condición:	Válvula 1 cerrada 45° - Válvula 4 cerrada 45°			
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,14	11,14	11,14	11,140
Temperatura (°T)	16,80	16,80	16,80	16,800
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,91	1,91	1,92	1,913
Temperatura (°T)	16,90	17,00	17,00	16,967
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	9,05	9,05	9,05	9,050
Temperatura (°T)	16,70	16,70	16,70	16,700

Prueba No. 11 - Toma No. 3				
Condición:	Válvula 1 cerrada 45° - Válvula 4 cerrada 45°			
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,20	11,20	11,20	11,200
Temperatura (°T)	16,80	16,80	16,90	16,833
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	1,91	1,91	1,91	1,910
Temperatura (°T)	16,80	16,80	16,80	16,800
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	9,00	9,01	9,01	9,007
Temperatura (°T)	16,60	16,60	16,60	16,600

Prueba No. 12 - Toma No. 1				
Condición:		Válvula 1 cerrada 45° - Válvula 3 cerrada 45°		
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,18	11,18	11,18	11,180
Temperatura (°T)	16,60	16,60	16,70	16,633
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,49	0,49	0,49	0,490
Temperatura (°T)	16,60	16,60	16,60	16,600
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	4,80	4,81	4,81	4,807
Temperatura (°T)	16,60	16,60	16,60	16,600

Prueba No. 12 - Toma No. 2				
Condición:		Válvula 1 cerrada 45° - Válvula 3 cerrada 45°		
Tanque No 1				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,17	11,16	11,16	11,163
Temperatura (°T)	16,70	16,70	16,70	16,700
Tanque No 2				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,04	0,04	0,04	0,040
Temperatura (°T)	16,60	16,60	16,60	16,600
Recipiente No 3				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,51	0,52	0,52	0,517
Temperatura (°T)	16,60	16,60	16,60	16,600
Recipiente No 4				
	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	4,79	4,80	4,80	4,797
Temperatura (°T)	16,60	16,60	16,60	16,600

Prueba No. 12 - Toma No. 3

Condición: Válvula 1 cerrada 45° - Válvula 3 cerrada 45°

Tanque No 1

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	11,19	11,19	11,19	11,190
Temperatura (°T)	16,70	16,70	16,70	16,700

Recipiente No 3

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	0,54	0,55	0,54	0,543
Temperatura (°T)	16,50	16,60	16,60	16,567

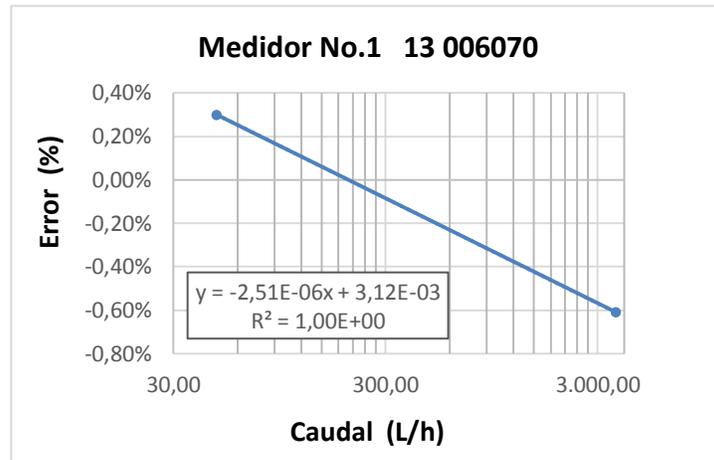
Recipiente No 4

	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Promedio
Conductividad (mS)	4,84	4,85	4,85	4,847
Temperatura (°T)	16,50	16,60	16,60	16,567

ANEXO No. 2 Ajuste del error para los medidores de agua usados

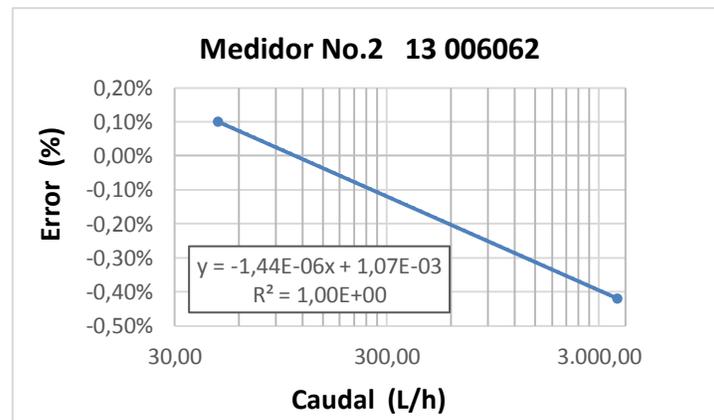
Medidor No.1 13 006070

Caudal L/h	Error
48,00	0,30%
3.666,32	-0,61%



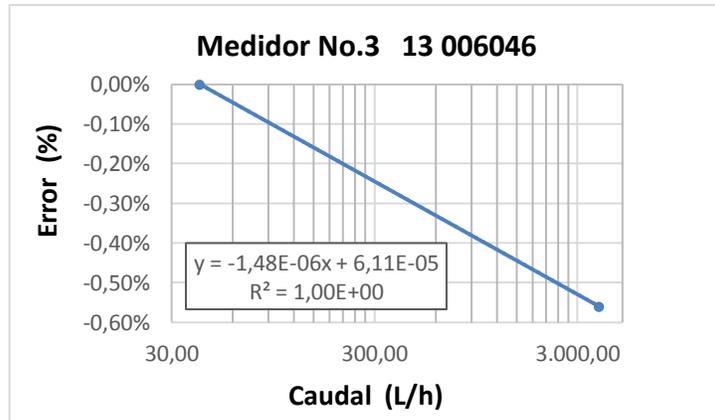
Medidor No.2 13 006062

Caudal L/h	Error
48,00	0,10%
3.666,32	-0,42%



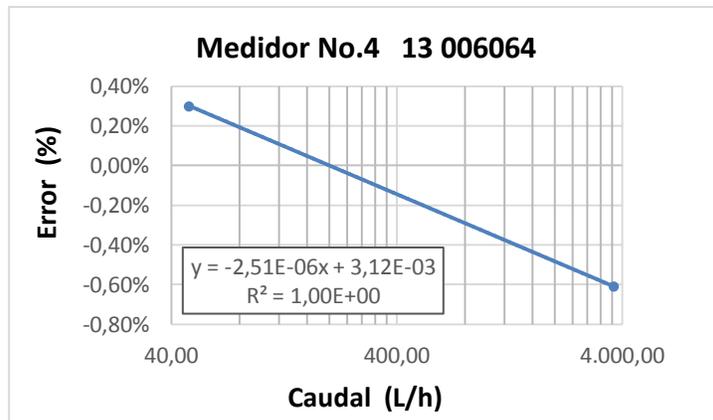
Medidor No.3 13 006046

Caudal L/h	Error
41,31	0,00%
3.824,74	-0,56%



Medidor No.4 13 006064

Caudal L/h	Error
48,00	0,30%
3.666,32	-0,61%



ANEXO No. 3 Cálculo de caudales

Prueba No. 1 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	535,44	517,28	18,16	0,404	1.452,8	-0,05%	0,404
2	512,19	494,98	17,21	0,382	1.376,8	-0,09%	0,383
3	573,55	554,98	18,57	0,413	1.485,6	-0,21%	0,414
4	471,84	454,04	17,8	0,396	1.424,0	-0,05%	0,396

Prueba No. 1 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	570,20	552,22	17,98	0,400	1.438,4	-0,05%	0,400
2	541,88	523,39	18,49	0,411	1.479,2	-0,11%	0,411
3	610,86	592,24	18,62	0,414	1.489,6	-0,21%	0,415
4	501,79	483,92	17,87	0,397	1.429,6	-0,05%	0,397

Prueba No. 1 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	604,89	586,96	17,93	0,398	1.434,4	-0,05%	0,399
2	579,34	561,36	17,98	0,400	1.438,4	-0,10%	0,400
3	651,16	632,90	18,26	0,406	1.460,8	-0,21%	0,407
4	536,65	519,01	17,64	0,392	1.411,2	-0,04%	0,392

Prueba No. 2 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	809,64	790,42	19,22	0,427	1.537,6	-0,08%	0,427
2	711,60	695,15	16,45	0,366	1.316,0	-0,08%	0,366
3	836,34	818,30	18,04	0,401	1.443,2	-0,21%	0,402
4	697,00	679,36	17,64	0,392	1.411,2	-0,04%	0,392

Prueba No. 2 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	838,04	818,96	19,08	0,424	1.526,4	-0,07%	0,424
2	736,79	720,50	16,29	0,362	1.303,2	-0,08%	0,362
3	864,42	846,54	17,88	0,397	1.430,4	-0,21%	0,398
4	723,46	705,96	17,5	0,389	1.400,0	-0,04%	0,389

Prueba No. 2 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	871,56	852,71	18,85	0,419	1.508,0	-0,07%	0,419
2	765,14	748,79	16,35	0,363	1.308,0	-0,08%	0,364
3	895,53	877,76	17,77	0,395	1.421,6	-0,20%	0,396
4	754,34	736,93	17,41	0,387	1.392,8	-0,04%	0,387

Prueba No. 3 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	708,52	688,67	19,85	0,441	1.588,0	-0,09%	0,441
2	649,79	643,80	5,99	0,133	479,2	0,04%	0,133
3	745,32	731,90	13,42	0,298	1.073,6	-0,15%	0,299
4	620,67	608,17	12,5	0,278	1.000,0	0,06%	0,278

Prueba No. 3 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	740,04	720,29	19,75	0,439	1.580,0	-0,09%	0,439
2	664,34	658,40	5,94	0,132	475,2	0,04%	0,132
3	771,60	758,30	13,3	0,296	1.064,0	-0,15%	0,296
4	641,62	629,23	12,39	0,275	991,2	0,06%	0,275

Prueba No. 3 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	772,88	753,36	19,52	0,434	1.561,6	-0,08%	0,434
2	677,14	671,26	5,88	0,131	470,4	0,04%	0,131
3	796,37	783,24	13,13	0,292	1.050,4	-0,15%	0,292
4	662,80	650,56	12,24	0,272	979,2	0,07%	0,272

Prueba No. 4 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	938,67	916,97	21,7	0,482	1.736,0	-0,13%	0,483
2	787,70	785,88	1,82	0,040	145,6	0,09%	0,040
3	948,71	936,42	12,29	0,273	983,2	-0,14%	0,273
4	792,40	781,07	11,33	0,252	906,4	0,08%	0,252

Prueba No. 4 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	971,63	950,16	21,47	0,477	1.717,6	-0,12%	0,478
2	791,82	789,95	1,87	0,042	149,6	0,09%	0,042
3	968,72	956,55	12,17	0,270	973,6	-0,14%	0,271
4	810,32	799,10	11,22	0,249	897,6	0,09%	0,249

Prueba No. 4 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	999,30	977,92	21,38	0,475	1.710,4	-0,12%	0,476
2	795,35	793,49	1,86	0,041	148,8	0,09%	0,041
3	986,52	974,35	12,17	0,270	973,6	-0,14%	0,271
4	824,94	813,79	11,15	0,248	892,0	0,09%	0,248

Prueba No. 5 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1024,50	1008,88	15,62	0,347	1.249,6	0,00%	0,347
2	824,48	805,45	19,03	0,423	1.522,4	-0,11%	0,423
3	1015,20	997,72	17,48	0,388	1.398,4	-0,20%	0,389
4	851,53	834,32	17,21	0,382	1.376,8	-0,03%	0,383

Prueba No. 5 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1049,22	1033,57	15,65	0,348	1.252,0	0,00%	0,348
2	853,58	834,90	18,68	0,415	1.494,4	-0,11%	0,416
3	1042,34	1025,03	17,31	0,385	1.384,8	-0,20%	0,385
4	878,54	861,47	17,07	0,379	1.365,6	-0,03%	0,379

Prueba No. 5 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1075,58	1060,02	15,56	0,346	1.244,8	0,00%	0,346
2	884,98	866,50	18,48	0,411	1.478,4	-0,11%	0,411
3	1072,11	1054,97	17,14	0,381	1.371,2	-0,20%	0,382
4	907,07	890,12	16,95	0,377	1.356,0	-0,03%	0,377

Prueba No. 6 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1990,46	1983,86	6,6	0,147	528,0	0,18%	0,146
2	915,70	895,02	20,68	0,460	1.654,4	-0,13%	0,460
3	1094,90	1081,37	13,53	0,301	1.082,4	-0,15%	0,301
4	930,04	916,27	13,77	0,306	1.101,6	0,04%	0,306

Prueba No. 6 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1104,12	1097,58	6,54	0,145	523,2	0,18%	0,145
2	945,29	924,85	20,44	0,454	1.635,2	-0,13%	0,455
3	1117,27	1103,88	13,39	0,298	1.071,2	-0,15%	0,298
4	951,68	938,04	13,64	0,303	1.091,2	0,04%	0,303

Prueba No. 6 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1119,31	1112,85	6,46	0,144	516,8	0,18%	0,143
2	977,04	956,60	20,44	0,454	1.635,2	-0,13%	0,455
3	1141,54	1128,22	13,32	0,296	1.065,6	-0,15%	0,296
4	975,24	961,60	13,64	0,303	1.091,2	0,04%	0,303

Prueba No. 7 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1128,71	1127,40	1,31	0,029	104,8	0,29%	0,029
2	1011,69	990,48	21,21	0,471	1.696,8	-0,14%	0,472
3	1164,33	1153,25	11,08	0,246	886,4	-0,13%	0,247
4	997,27	985,75	11,52	0,256	921,6	0,08%	0,256

Prueba No. 7 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1131,77	1130,46	1,31	0,029	104,8	0,29%	0,029
2	1039,17	1018,10	21,07	0,468	1.685,6	-0,14%	0,469
3	1180,74	1169,69	11,05	0,246	884,0	-0,12%	0,246
4	1012,20	1000,74	11,46	0,255	916,8	0,08%	0,254

Prueba No. 7 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1135,06	1133,76	1,3	0,029	104,0	0,29%	0,029
2	1070,37	1049,27	21,1	0,469	1.688,0	-0,14%	0,470
3	1198,99	1187,95	11,04	0,245	883,2	-0,12%	0,246
4	1029,11	1017,69	11,42	0,254	913,6	0,08%	0,254

Prueba No. 8 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1168,62	1151,08	17,54	0,390	1.403,2	-0,04%	0,390
2	1103,56	1086,32	17,24	0,383	1.379,2	-0,09%	0,383
3	1231,86	1216,14	15,72	0,349	1.257,6	-0,18%	0,350
4	1064,03	1044,97	19,06	0,424	1.524,8	-0,07%	0,424

Prueba No. 8 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1194,47	1177,36	17,11	0,380	1.368,8	-0,03%	0,380
2	1130,98	1114,15	16,83	0,374	1.346,4	-0,09%	0,374
3	1254,92	1239,56	15,36	0,341	1.228,8	-0,18%	0,342
4	1094,54	1075,95	18,59	0,413	1.487,2	-0,06%	0,413

Prueba No. 8 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1215,20	1198,30	16,9	0,376	1.352,0	-0,03%	0,376
2	1150,01	1133,96	16,05	0,357	1.284,0	-0,08%	0,357
3	1273,60	1258,69	14,91	0,331	1.192,8	-0,17%	0,332
4	1116,20	1098,12	18,08	0,402	1.446,4	-0,05%	0,402

Prueba No. 9 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1234,90	1219,87	15,03	0,334	1.202,4	0,01%	0,334
2	1167,32	1153,72	13,6	0,302	1.088,0	-0,05%	0,302
3	1284,59	1277,07	7,52	0,167	601,6	-0,08%	0,167
4	1142,80	1121,70	21,1	0,469	1.688,0	-0,11%	0,469

Prueba No. 9 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1251,18	1238,70	12,48	0,312	1.123,2	0,03%	0,312
2	1183,84	1171,18	12,66	0,316	1.139,4	-0,06%	0,317
3	1293,33	1286,78	6,55	0,164	589,5	-0,08%	0,164
4	1166,92	1148,32	18,6	0,465	1.674,0	-0,11%	0,466

Prueba No. 9 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1271,52	1256,84	14,68	0,326	1.174,4	0,02%	0,326
2	1201,52	1188,76	12,76	0,284	1.020,8	-0,04%	0,284
3	1303,93	1296,79	7,14	0,159	571,2	-0,08%	0,159
4	1194,74	1174,50	20,24	0,450	1.619,2	-0,10%	0,450

Prueba No. 10 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1320,88	1308,41	12,47	0,277	997,6	0,06%	0,277
2	1250,33	1236,77	13,56	0,301	1.084,8	-0,05%	0,301
3	1329,09	1325,28	3,81	0,085	304,8	-0,04%	0,085
4	1268,19	1246,00	22,19	0,493	1.775,2	-0,13%	0,494

Prueba No. 10 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1339,52	1326,07	13,45	0,299	1.076,0	0,04%	0,299
2	1266,40	1254,68	11,72	0,260	937,6	-0,03%	0,261
3	1336,94	1333,24	3,7	0,082	296,0	-0,04%	0,082
4	1296,98	1275,57	21,41	0,476	1.712,8	-0,12%	0,476

Prueba No. 10 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1356,79	1344,14	12,65	0,281	1.012,0	0,06%	0,281
2	1282,96	1270,75	12,21	0,271	976,8	-0,03%	0,271
3	1345,16	1341,51	3,65	0,081	292,0	-0,04%	0,081
4	1324,79	1303,60	21,19	0,471	1.695,2	-0,11%	0,471

Prueba No. 11 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1384,66	1378,20	6,46	0,144	516,8	0,18%	0,143
2	1318,99	1301,55	17,44	0,388	1.395,2	-0,09%	0,388
3	1387,93	1368,28	19,65	0,437	1.572,0	-0,23%	0,438
4	1346,74	1342,50	4,24	0,094	339,2	0,23%	0,094

Prueba No. 11 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1394,24	1387,84	6,4	0,142	512,0	0,18%	0,142
2	1342,66	1325,31	17,35	0,386	1.388,0	-0,09%	0,386
3	1416,96	1397,44	19,52	0,434	1.561,6	-0,23%	0,435
4	1352,99	1348,78	4,21	0,094	336,8	0,23%	0,093

Prueba No. 11 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1403,68	1397,34	6,34	0,141	507,2	0,18%	0,141
2	1366,65	1349,38	17,27	0,384	1.381,6	-0,09%	0,384
3	1446,18	1426,80	19,38	0,431	1.550,4	-0,22%	0,432
4	1359,34	1355,15	4,19	0,093	335,2	0,23%	0,093

Prueba No. 12 - Toma No. 1

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1419,04	1411,38	7,66	0,170	612,8	0,16%	0,170
2	1393,65	1376,38	17,27	0,384	1.381,6	-0,09%	0,384
3	1464,34	1457,78	6,56	0,146	524,8	-0,07%	0,146
4	1385,96	1367,60	18,36	0,408	1.468,8	-0,06%	0,408

Prueba No. 12 - Toma No. 2

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1429,76	1422,24	7,52	0,167	601,6	0,16%	0,167
2	1417,10	1399,92	17,18	0,382	1.374,4	-0,09%	0,382
3	1476,26	1469,84	6,42	0,143	513,6	-0,07%	0,143
4	1410,16	1391,94	18,22	0,405	1.457,6	-0,05%	0,405

Prueba No. 12 - Toma No. 3

Medidor	Lectura final	Lectura inicial	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/h)	Error	Caudal ajustado (L/s)
1	1440,74	1433,26	7,48	0,166	598,4	0,16%	0,166
2	1440,66	1424,20	16,46	0,366	1.316,8	-0,08%	0,366
3	1488,08	1481,86	6,22	0,138	497,6	-0,07%	0,138
4	1434,88	1417,19	17,69	0,393	1.415,2	-0,04%	0,393

ANEXO No. 4 Cálculo de parámetros hidráulicos

Prueba No. 1 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,40	16,70	1,087E-06	0,56	15.662	0,227
2	0,38	16,70	1,087E-06	0,53	14.848	0,204
3	0,41	16,77	1,085E-06	0,58	16.070	0,238
4	0,40	16,73	1,086E-06	0,55	15.364	0,218

Prueba No. 1 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,40	16,90	1,081E-06	0,56	15.591	0,223
2	0,41	16,90	1,081E-06	0,57	16.042	0,236
3	0,41	17,00	1,078E-06	0,58	16.217	0,240
4	0,40	16,90	1,081E-06	0,55	15.495	0,220

Prueba No. 1 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,40	16,70	1,087E-06	0,56	15.462	0,222
2	0,40	16,70	1,087E-06	0,56	15.513	0,223
3	0,41	16,67	1,088E-06	0,57	15.758	0,231
4	0,39	16,83	1,083E-06	0,55	15.267	0,214

Prueba No. 2 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,43	15,23	1,132E-06	0,60	15.917	0,255
2	0,37	15,23	1,132E-06	0,51	13.624	0,187
3	0,40	15,60	1,121E-06	0,56	15.114	0,225
4	0,39	15,70	1,117E-06	0,55	14.796	0,214

Prueba No. 2 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,42	15,37	1,128E-06	0,59	15.860	0,251
2	0,36	15,37	1,128E-06	0,51	13.542	0,183
3	0,40	15,87	1,112E-06	0,56	15.092	0,221
4	0,39	15,67	1,119E-06	0,54	14.664	0,211

Prueba No. 2 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,42	15,53	1,123E-06	0,59	15.741	0,245
2	0,36	15,53	1,123E-06	0,51	13.655	0,184
3	0,40	16,03	1,107E-06	0,55	15.068	0,218
4	0,39	15,70	1,117E-06	0,54	14.602	0,209

Prueba No. 3 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,44	16,47	1,094E-06	0,62	17.015	0,272
2	0,13	16,47	1,094E-06	0,19	5.128	0,025
3	0,30	16,80	1,084E-06	0,42	11.617	0,124
4	0,28	16,70	1,087E-06	0,39	10.768	0,107

Prueba No. 3 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,44	16,67	1,088E-06	0,61	17.023	0,269
2	0,13	16,67	1,088E-06	0,18	5.113	0,024
3	0,30	16,67	1,088E-06	0,41	11.471	0,122
4	0,28	16,70	1,087E-06	0,38	10.673	0,106

Prueba No. 3 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,43	16,63	1,089E-06	0,61	16.808	0,263
2	0,13	16,63	1,089E-06	0,18	5.057	0,024
3	0,29	16,37	1,097E-06	0,41	11.231	0,119
4	0,27	16,40	1,096E-06	0,38	10.457	0,103

Prueba No. 4 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,48	15,67	1,119E-06	0,67	18.199	0,325
2	0,04	15,67	1,119E-06	0,06	1.523	0,002
3	0,27	16,23	1,101E-06	0,38	10.473	0,104
4	0,25	16,20	1,102E-06	0,35	9.624	0,088

Prueba No. 4 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,48	15,87	1,112E-06	0,67	18.106	0,318
2	0,04	15,87	1,112E-06	0,06	1.574	0,002
3	0,27	16,40	1,096E-06	0,38	10.418	0,102
4	0,25	16,37	1,097E-06	0,35	9.575	0,087

Prueba No. 4 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,48	16,00	1,108E-06	0,66	18.097	0,316
2	0,04	16,00	1,108E-06	0,06	1.571	0,002
3	0,27	16,57	1,091E-06	0,38	10.466	0,102
4	0,25	16,40	1,096E-06	0,35	9.523	0,085

Prueba No. 5 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,35	16,43	1,095E-06	0,48	13.366	0,168
2	0,42	16,43	1,095E-06	0,59	16.301	0,250
3	0,39	17,20	1,072E-06	0,54	15.305	0,211
4	0,38	16,97	1,079E-06	0,53	14.948	0,204

Prueba No. 5 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,35	16,83	1,083E-06	0,49	13.539	0,169
2	0,42	16,83	1,083E-06	0,58	16.178	0,241
3	0,39	17,73	1,057E-06	0,54	15.376	0,207
4	0,38	17,47	1,064E-06	0,53	15.029	0,201

Prueba No. 5 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,35	16,80	1,084E-06	0,48	13.449	0,167
2	0,41	16,80	1,084E-06	0,57	15.990	0,236
3	0,38	17,53	1,063E-06	0,53	15.143	0,203
4	0,38	17,40	1,066E-06	0,53	14.896	0,198

Prueba No. 6 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,15	17,17	1,073E-06	0,20	5.752	0,030
2	0,46	17,17	1,073E-06	0,64	18.078	0,295
3	0,30	17,97	1,050E-06	0,42	12.088	0,126
4	0,31	18,17	1,045E-06	0,43	12.345	0,130

Prueba No. 6 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,15	17,43	1,065E-06	0,20	5.741	0,029
2	0,45	17,43	1,065E-06	0,63	17.997	0,288
3	0,30	18,40	1,038E-06	0,42	12.101	0,124
4	0,30	18,30	1,041E-06	0,42	12.271	0,128

Prueba No. 6 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,14	17,43	1,065E-06	0,20	5.670	0,029
2	0,45	17,43	1,065E-06	0,63	17.997	0,288
3	0,30	18,33	1,040E-06	0,41	12.017	0,123
4	0,30	18,07	1,047E-06	0,42	12.195	0,128

Prueba No. 7 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,03	17,47	1,064E-06	0,04	1.150	0,001
2	0,47	17,93	1,051E-06	0,66	18.929	0,311
3	0,25	18,40	1,038E-06	0,34	10.011	0,085
4	0,26	18,50	1,036E-06	0,36	10.414	0,091

Prueba No. 7 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,03	17,47	1,064E-06	0,04	1.150	0,001
2	0,47	17,47	1,064E-06	0,65	18.570	0,306
3	0,25	18,33	1,040E-06	0,34	9.966	0,084
4	0,25	18,40	1,038E-06	0,36	10.333	0,090

Prueba No. 7 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,03	17,60	1,061E-06	0,04	1.145	0,001
2	0,47	17,60	1,061E-06	0,66	18.663	0,307
3	0,25	18,23	1,043E-06	0,34	9.931	0,084
4	0,25	18,33	1,040E-06	0,35	10.278	0,090

Prueba No. 8 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,39	17,77	1,056E-06	0,54	15.569	0,212
2	0,38	17,77	1,056E-06	0,54	15.311	0,205
3	0,35	18,13	1,046E-06	0,49	14.111	0,171
4	0,42	17,87	1,053E-06	0,59	16.969	0,250

Prueba No. 8 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,38	17,47	1,064E-06	0,53	15.064	0,202
2	0,37	17,47	1,064E-06	0,52	14.826	0,195
3	0,34	17,80	1,055E-06	0,48	13.665	0,163
4	0,41	17,70	1,058E-06	0,58	16.475	0,238

Prueba No. 8 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,38	17,63	1,060E-06	0,52	14.946	0,197
2	0,36	17,63	1,060E-06	0,50	14.201	0,178
3	0,33	18,23	1,043E-06	0,46	13.418	0,154
4	0,40	17,80	1,055E-06	0,56	16.065	0,225

Prueba No. 9 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,33	17,13	1,074E-06	0,47	13.108	0,156
2	0,30	17,13	1,074E-06	0,42	11.868	0,127
3	0,17	17,30	1,069E-06	0,23	6.594	0,039
4	0,47	17,20	1,072E-06	0,66	18.458	0,307

Prueba No. 9 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,31	17,33	1,068E-06	0,44	12.309	0,136
2	0,32	17,33	1,068E-06	0,44	12.497	0,140
3	0,16	17,80	1,055E-06	0,23	6.549	0,037
4	0,47	17,67	1,059E-06	0,65	18.537	0,302

Prueba No. 9 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,33	17,27	1,070E-06	0,46	12.849	0,148
2	0,28	17,27	1,070E-06	0,40	11.174	0,112
3	0,16	17,73	1,057E-06	0,22	6.334	0,035
4	0,45	17,40	1,066E-06	0,63	17.799	0,283

Prueba No. 10 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,28	17,17	1,073E-06	0,39	10.880	0,107
2	0,30	17,17	1,073E-06	0,42	11.844	0,127
3	0,08	17,20	1,072E-06	0,12	3.330	0,010
4	0,49	17,20	1,072E-06	0,69	19.416	0,340

Prueba No. 10 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,30	17,10	1,075E-06	0,42	11.716	0,124
2	0,26	17,10	1,075E-06	0,36	10.216	0,095
3	0,08	17,20	1,072E-06	0,11	3.234	0,009
4	0,48	17,20	1,072E-06	0,66	18.730	0,316

Prueba No. 10 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,28	17,10	1,075E-06	0,39	11.017	0,110
2	0,27	17,10	1,075E-06	0,38	10.644	0,103
3	0,08	17,10	1,075E-06	0,11	3.182	0,009
4	0,47	17,10	1,075E-06	0,66	18.487	0,310

Prueba No. 11 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,14	16,97	1,079E-06	0,20	5.599	0,029
2	0,39	16,97	1,079E-06	0,54	15.157	0,210
3	0,44	16,97	1,079E-06	0,61	17.100	0,267
4	0,09	16,77	1,085E-06	0,13	3.653	0,012

Prueba No. 11 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,14	16,80	1,084E-06	0,20	5.522	0,028
2	0,39	16,80	1,084E-06	0,54	15.010	0,208
3	0,43	16,97	1,079E-06	0,61	16.987	0,264
4	0,09	16,70	1,087E-06	0,13	3.621	0,012

Prueba No. 11 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,14	16,83	1,083E-06	0,20	5.475	0,028
2	0,38	16,83	1,083E-06	0,54	14.954	0,206
3	0,43	16,80	1,084E-06	0,60	16.788	0,260
4	0,09	16,60	1,090E-06	0,13	3.594	0,012

Prueba No. 12 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,17	16,63	1,089E-06	0,24	6.580	0,040
2	0,38	16,63	1,089E-06	0,54	14.872	0,206
3	0,15	16,60	1,090E-06	0,20	5.643	0,030
4	0,41	16,60	1,090E-06	0,57	15.791	0,232

Prueba No. 12 - Toma No. 2

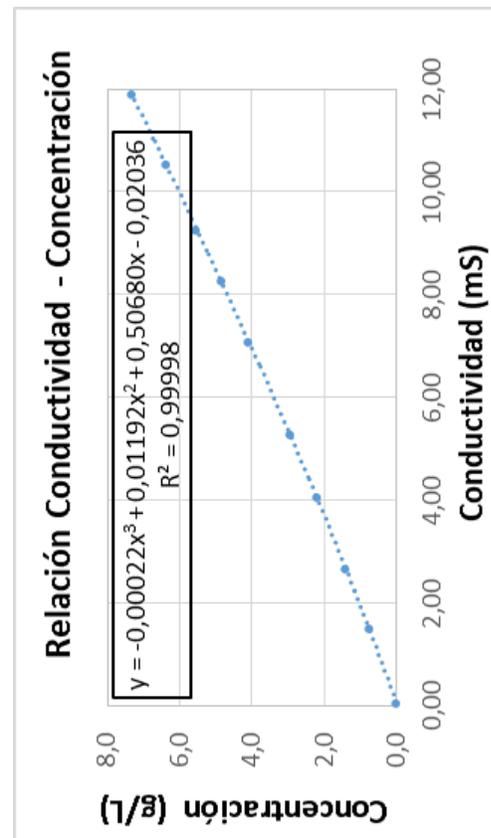
Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,17	16,70	1,087E-06	0,23	6.472	0,039
2	0,38	16,70	1,087E-06	0,53	14.822	0,204
3	0,14	16,60	1,090E-06	0,20	5.522	0,028
4	0,41	16,60	1,090E-06	0,57	15.670	0,229

Prueba No. 12 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Velocidad (m/s)	Re	Cantidad movimiento (N)
1	0,17	16,70	1,087E-06	0,23	6.437	0,038
2	0,37	16,70	1,087E-06	0,51	14.200	0,187
3	0,14	16,57	1,091E-06	0,19	5.345	0,027
4	0,39	16,57	1,091E-06	0,55	15.199	0,216

ANEXO No. 5 Relación entre conductividad y concentración de soluto para el agua utilizada en el experimento

No. PRUEBA	SAL AGREGADA	CONTENIDO SAL (g)	CONDUCTIVIDAD (Ms)	TEMPERATURA °T	CORRECCIÓN CONDUCTIVIDAD POR °T	CONDUCTIVIDAD CORREGIDA (Ms)	VOLUMEN AGUA (L)	CONCENTRACIÓN (g/L)	ENTRA CONDUCTIV = CONCENTRACION
0	0,00	0,00	0,042	17,70	-14,53%	0,042	1,00	0,000	0,011
1	0,77	0,77	1,505	17,70	-14,53%	1,505	1,00	0,770	0,773
2	0,65	1,42	2,675	17,80	-14,36%	2,675	1,00	1,415	1,417
3	0,78	2,20	4,05	17,90	-14,19%	4,050	0,99	2,217	2,212
4	0,74	2,93	5,29	18,00	-14,01%	5,290	0,99	2,960	2,961
5	1,08	4,01	7,08	18,30	-13,41%	7,080	0,98	4,092	4,087
6	0,74	4,75	8,28	18,50	-12,95%	8,280	0,98	4,847	4,869
7	0,63	5,38	9,27	18,60	-12,71%	9,270	0,97	5,546	5,528
8	0,81	6,19	10,53	18,70	-12,45%	10,530	0,97	6,381	6,382
9	0,91	7,10	11,89	18,70	-12,45%	11,890	0,97	7,320	7,321



ANEXO No. 6 Cálculo de la concentración mediante las diferentes ecuaciones estudiadas

Prueba No. 1 - Toma No. 1					
Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,404	11,880	16,700	11,880	7,314
2	0,383	0,047	16,700	0,047	0,014
3	0,414	1,813	16,767	1,813	0,940
4	0,396	10,550	16,733	10,550	6,396
Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,94	0,15	0,36	1,03
	Error (%)	0%	-84%	-62%	10%
T4	Valor (mg/L)	6,40	7,31	7,31	6,49
	Error (%)	0%	14%	14%	2%

Prueba No. 1 - Toma No. 2					
Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,400	11,793	16,900	11,793	7,254
2	0,411	0,047	16,900	0,047	0,014
3	0,415	1,797	17,000	1,797	0,930
4	0,397	10,397	16,900	10,397	6,291
Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,93	0,01	0,01	0,98
	Error (%)	0%	-99%	-99%	5%
T4	Valor (mg/L)	6,29	7,30	7,31	6,34
	Error (%)	0%	16%	16%	1%

Prueba No. 1 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,399	11,667	16,700	11,667	7,166
2	0,400	0,047	16,700	0,047	0,014
3	0,407	1,860	16,667	1,860	0,965
4	0,392	10,340	16,833	10,340	6,252

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,97	0,01	0,01	1,01
	Error (%)	0%	-99%	-99%	4%
T4	Valor (mg/L)	6,25	7,28	7,29	6,30
	Error (%)	0%	16%	17%	1%

Prueba No. 2 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,427	11,810	15,233	11,810	7,265
2	0,366	0,047	15,233	0,047	0,014
3	0,402	2,400	15,600	2,400	1,263
4	0,392	10,880	15,700	10,880	6,622

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	1,26	0,65	0,66	1,28
	Error (%)	0%	-49%	-48%	1%
T4	Valor (mg/L)	6,62	7,27	7,27	6,64
	Error (%)	0%	10%	10%	0%

Prueba No. 2 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,424	11,777	15,367	11,777	7,242
2	0,362	0,047	15,367	0,047	0,014
3	0,398	2,493	15,867	2,493	1,315
4	0,389	10,797	15,667	10,797	6,565

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	1,32	0,65	0,66	1,32
	Error (%)	0%	-50%	-50%	0%
T4	Valor (mg/L)	6,56	7,24	7,24	6,56
	Error (%)	0%	10%	10%	0%

Prueba No. 2 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,419	11,727	15,533	11,727	7,207
2	0,364	0,047	15,533	0,047	0,014
3	0,396	2,330	16,033	2,330	1,224
4	0,387	10,757	15,700	10,757	6,537

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	1,22	0,60	0,60	1,25
	Error (%)	0%	-51%	-51%	2%
T4	Valor (mg/L)	6,54	7,21	7,21	6,57
	Error (%)	0%	10%	10%	0%

Prueba No. 3 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,441	11,480	16,467	11,480	7,036
2	0,133	0,047	16,467	0,047	0,014
3	0,299	7,390	16,800	7,390	4,287
4	0,278	10,887	16,700	10,887	6,627

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	4,29	3,87	3,90	4,25
	Error (%)	0%	-10%	-9%	-1%
T4	Valor (mg/L)	6,63	7,04	7,04	6,58
	Error (%)	0%	6%	6%	-1%

Prueba No. 3 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,439	11,460	16,667	11,460	7,022
2	0,132	0,047	16,667	0,047	0,014
3	0,296	7,320	16,667	7,320	4,242
4	0,275	10,897	16,700	10,897	6,634

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	4,24	3,90	3,90	4,26
	Error (%)	0%	-8%	-8%	0%
T4	Valor (mg/L)	6,63	7,02	7,02	6,65
	Error (%)	0%	6%	6%	0%

Prueba No. 3 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,434	11,403	16,633	11,403	6,983
2	0,131	0,047	16,633	0,047	0,014
3	0,292	7,250	16,367	7,250	4,196
4	0,272	10,857	16,400	10,857	6,606

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	4,20	3,88	3,87	4,24
	Error (%)	0%	-7%	-8%	1%
T4	Valor (mg/L)	6,61	6,98	6,98	6,65
	Error (%)	0%	6%	6%	1%

Prueba No. 4 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,483	11,653	15,667	11,653	7,156
2	0,040	0,047	15,667	0,047	0,014
3	0,273	10,447	16,233	10,447	6,325
4	0,252	11,280	16,200	11,280	6,898

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	6,33	6,05	6,10	6,29
	Error (%)	0%	-4%	-4%	-1%
T4	Valor (mg/L)	6,90	7,16	7,16	6,86
	Error (%)	0%	4%	4%	-1%

Prueba No. 4 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,478	11,647	15,867	11,647	7,152
2	0,042	0,047	15,867	0,047	0,014
3	0,271	10,433	16,400	10,433	6,316
4	0,249	11,250	16,367	11,250	6,877

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	6,32	6,04	6,06	6,29
	Error (%)	0%	-4%	-4%	0%
T4	Valor (mg/L)	6,88	7,15	7,15	6,85
	Error (%)	0%	4%	4%	0%

Prueba No. 4 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,476	11,540	16,000	11,540	7,078
2	0,041	0,047	16,000	0,047	0,014
3	0,271	10,473	16,567	10,473	6,343
4	0,248	11,170	16,400	11,170	6,822

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	6,34	5,96	6,00	6,20
	Error (%)	0%	-6%	-5%	-2%
T4	Valor (mg/L)	6,82	7,08	7,08	6,66
	Error (%)	0%	4%	4%	-2%

Prueba No. 5 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,347	11,773	16,433	11,773	7,240
2	0,423	0,047	16,433	0,047	0,014
3	0,389	1,253	17,200	1,253	0,638
4	0,383	9,840	16,967	9,840	5,912

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,64	0,01	0,01	0,66
	Error (%)	0%	-98%	-98%	3%
T4	Valor (mg/L)	5,91	6,57	6,58	5,93
	Error (%)	0%	11%	11%	0%

Prueba No. 5 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,348	11,657	16,833	11,657	7,159
2	0,416	0,047	16,833	0,047	0,014
3	0,385	1,267	17,733	1,267	0,645
4	0,379	9,830	17,467	9,830	5,905

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,65	0,01	0,01	0,66
	Error (%)	0%	-98%	-98%	2%
T4	Valor (mg/L)	5,91	6,56	6,58	5,92
	Error (%)	0%	11%	11%	0%

Prueba No. 5 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,346	11,523	16,800	11,523	7,066
2	0,411	0,047	16,800	0,047	0,014
3	0,382	1,270	17,533	1,270	0,647
4	0,377	9,733	17,400	9,733	5,840

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,65	0,01	0,01	0,65
	Error (%)	0%	-98%	-98%	1%
T4	Valor (mg/L)	5,84	6,49	6,50	5,84
	Error (%)	0%	11%	11%	0%

Prueba No. 6 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,146	11,397	17,167	11,397	6,979
2	0,460	0,047	17,167	0,047	0,014
3	0,301	0,710	17,967	0,710	0,352
4	0,306	5,300	18,167	5,300	2,967

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,35	0,01	0,01	0,40
	Error (%)	0%	-96%	-96%	14%
T4	Valor (mg/L)	2,97	3,35	3,35	3,01
	Error (%)	0%	13%	13%	2%

Prueba No. 6 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,145	11,410	17,433	11,410	6,988
2	0,455	0,047	17,433	0,047	0,014
3	0,298	0,740	18,400	0,740	0,368
4	0,303	5,260	18,300	5,260	2,942

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,37	0,01	0,01	0,43
	Error (%)	0%	-96%	-96%	17%
T4	Valor (mg/L)	2,94	3,35	3,36	3,00
	Error (%)	0%	14%	14%	2%

Prueba No. 6 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,143	11,413	17,433	11,413	6,990
2	0,455	0,047	17,433	0,047	0,014
3	0,296	0,730	18,333	0,730	0,363
4	0,303	5,247	18,067	5,247	2,934

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,36	0,01	0,01	0,40
	Error (%)	0%	-96%	-96%	11%
T4	Valor (mg/L)	2,93	3,31	3,32	2,97
	Error (%)	0%	13%	13%	1%

Prueba No. 7 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,029	11,417	17,467	11,417	6,992
2	0,472	0,047	17,933	0,047	0,014
3	0,247	0,560	18,400	0,560	0,275
4	0,256	0,997	18,500	0,997	0,502

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,27	0,01	0,01	0,33
	Error (%)	0%	-95%	-95%	19%
T4	Valor (mg/L)	0,50	0,81	0,81	0,55
	Error (%)	0%	60%	61%	10%

Prueba No. 7 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,029	11,423	17,467	11,423	6,997
2	0,469	0,047	17,467	0,047	0,014
3	0,246	0,548	18,333	0,548	0,269
4	0,254	1,040	18,400	1,040	0,525

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,27	0,01	0,01	0,31
	Error (%)	0%	-95%	-95%	15%
T4	Valor (mg/L)	0,53	0,81	0,81	0,56
	Error (%)	0%	54%	55%	7%

Prueba No. 7 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,029	11,437	17,600	11,437	7,006
2	0,470	0,047	17,600	0,047	0,014
3	0,246	0,540	18,233	0,540	0,265
4	0,254	1,080	18,333	1,080	0,546

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,26	0,01	0,01	0,28
	Error (%)	0%	-95%	-95%	7%
T4	Valor (mg/L)	0,55	0,81	0,81	0,56
	Error (%)	0%	48%	48%	3%

Prueba No. 8 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,390	11,757	17,767	11,757	7,228
2	0,383	0,047	17,767	0,047	0,014
3	0,350	1,303	18,133	1,303	0,665
4	0,424	10,097	17,867	10,097	6,086

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,66	0,69	0,68	0,70
	Error (%)	0%	-203%	-203%	5%
T4	Valor (mg/L)	6,09	7,23	7,23	6,11
	Error (%)	0%	19%	19%	0%

Prueba No. 8 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,380	11,767	17,467	11,767	7,235
2	0,374	0,047	17,467	0,047	0,014
3	0,342	1,470	17,800	1,470	0,754
4	0,413	9,993	17,700	9,993	6,016

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,75	- 0,68	- 0,68	0,79
	Error (%)	0%	-191%	-190%	5%
T4	Valor (mg/L)	6,02	7,24	7,24	6,05
	Error (%)	0%	20%	20%	0%

Prueba No. 8 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,376	11,737	17,633	11,737	7,214
2	0,357	0,047	17,633	0,047	0,014
3	0,332	1,583	18,233	1,583	0,815
4	0,402	10,207	17,800	10,207	6,161

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,81	- 0,56	- 0,54	0,72
	Error (%)	0%	-168%	-167%	-12%
T4	Valor (mg/L)	6,16	7,21	7,21	6,08
	Error (%)	0%	17%	17%	-1%

Prueba No. 9 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,334	11,750	17,133	11,750	7,223
2	0,302	0,047	17,133	0,047	0,014
3	0,167	0,820	17,300	0,820	0,410
4	0,469	8,560	17,200	8,560	5,054

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,41	- 5,83	- 5,82	0,26
	Error (%)	0%	-1522%	-1520%	-36%
T4	Valor (mg/L)	5,05	7,22	7,22	5,00
	Error (%)	0%	43%	43%	-1%

Prueba No. 9 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,312	11,700	17,333	11,700	7,189
2	0,317	0,047	17,333	0,047	0,014
3	0,164	0,677	17,800	0,677	0,335
4	0,466	8,000	17,667	8,000	4,685

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,34	0,01	0,01	0,40
	Error (%)	0%	-96%	-96%	20%
T4	Valor (mg/L)	4,68	4,82	4,83	4,71
	Error (%)	0%	3%	3%	1%

Prueba No. 9 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,326	11,727	17,267	11,727	7,207
2	0,284	0,047	17,267	0,047	0,014
3	0,159	0,800	17,733	0,800	0,399
4	0,450	8,680	17,400	8,680	5,134

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,40	- 5,61	- 5,63	0,27
	Error (%)	0%	-1504%	-1509%	-31%
T4	Valor (mg/L)	5,13	7,21	7,21	5,09
	Error (%)	0%	40%	40%	-1%

Prueba No. 10 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,277	11,843	17,167	11,843	7,288
2	0,301	0,047	17,167	0,047	0,014
3	0,085	0,420	17,200	0,420	0,203
4	0,494	6,893	17,200	6,893	3,967

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,20	0,01	0,01	0,75
	Error (%)	0%	-93%	-93%	270%
T4	Valor (mg/L)	3,97	4,09	4,09	4,06
	Error (%)	0%	3%	3%	2%

Prueba No. 10 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,299	11,837	17,100	11,837	7,284
2	0,261	0,047	17,100	0,047	0,014
3	0,082	0,530	17,200	0,530	0,259
4	0,476	7,800	17,200	7,800	4,554

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,26	- 15,68	- 15,71	0,13
	Error (%)	0%	-6145%	-6158%	-51%
T4	Valor (mg/L)	4,55	7,28	7,28	4,53
	Error (%)	0%	60%	60%	0%

Prueba No. 10 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,281	11,810	17,100	11,810	7,265
2	0,271	0,047	17,100	0,047	0,014
3	0,081	0,620	17,100	0,620	0,306
4	0,471	7,407	17,100	7,407	4,298

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,31	- 17,01	- 17,00	0,23
	Error (%)	0%	-5662%	-5659%	-24%
T4	Valor (mg/L)	4,30	7,27	7,27	4,28
	Error (%)	0%	69%	69%	0%

Prueba No. 11 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,143	11,240	16,967	11,240	6,870
2	0,388	0,047	16,967	0,047	0,014
3	0,438	1,910	16,967	1,910	0,992
4	0,094	8,830	16,767	8,830	5,233

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,99	0,01	0,01	1,14
	Error (%)	0%	-99%	-99%	15%
T4	Valor (mg/L)	5,23	10,46	10,47	5,91
	Error (%)	0%	100%	100%	13%

Prueba No. 11 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,142	11,140	16,800	11,140	6,801
2	0,386	0,047	16,800	0,047	0,014
3	0,435	1,913	16,967	1,913	0,994
4	0,093	9,050	16,700	9,050	5,380

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,99	0,01	0,01	1,08
	Error (%)	0%	-99%	-99%	8%
T4	Valor (mg/L)	5,38	10,34	10,34	5,77
	Error (%)	0%	92%	92%	7%

Prueba No. 11 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,141	11,200	16,833	11,200	6,843
2	0,384	0,047	16,833	0,047	0,014
3	0,432	1,910	16,800	1,910	0,992
4	0,093	9,007	16,600	9,007	5,351

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,99	0,01	0,01	1,09
	Error (%)	0%	-99%	-99%	10%
T4	Valor (mg/L)	5,35	10,35	10,35	5,80
	Error (%)	0%	93%	93%	8%

Prueba No. 12 - Toma No. 1

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,170	11,180	16,633	11,180	6,829
2	0,384	0,047	16,633	0,047	0,014
3	0,146	0,490	16,600	0,490	0,239
4	0,408	4,807	16,600	4,807	2,666

Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,24	0,01	0,01	0,53
	Error (%)	0%	-94%	-94%	123%
T4	Valor (mg/L)	2,67	2,85	2,85	2,77
	Error (%)	0%	7%	7%	4%

Prueba No. 12 - Toma No. 2

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,167	11,163	16,700	11,163	6,817
2	0,382	0,040	16,700	0,040	0,010
3	0,143	0,517	16,600	0,517	0,253
4	0,405	4,797	16,600	4,797	2,660

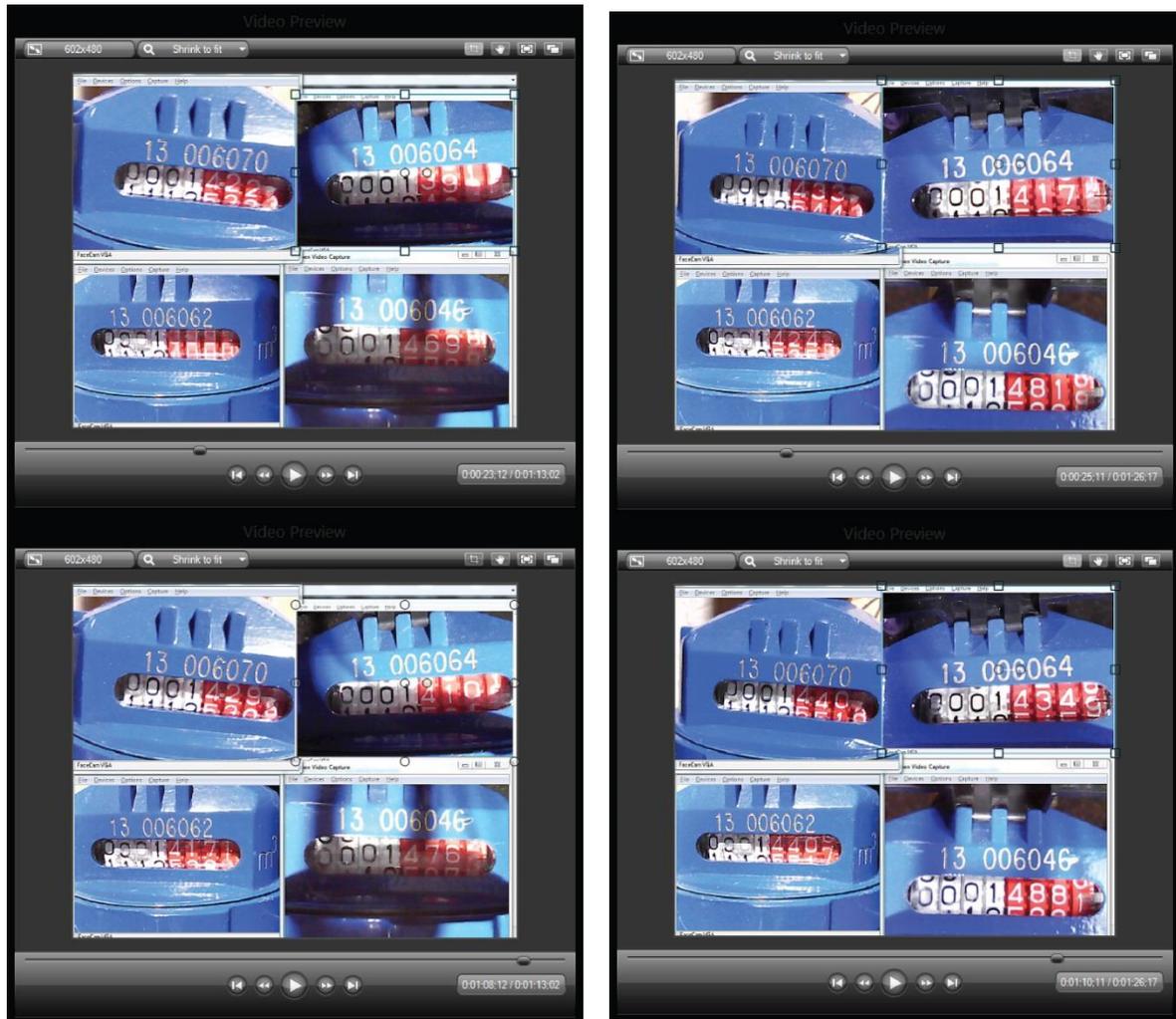
Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,25	0,01	0,01	0,45
	Error (%)	0%	-96%	-96%	77%
T4	Valor (mg/L)	2,66	2,81	2,81	2,73
	Error (%)	0%	6%	6%	3%

Prueba No. 12 - Toma No. 3

Tubería	Caudal (L/s)	Conductividad (mS)	Temperatura °C	Conductividad corregida por °T (mS)	Concentración (g/L)
1	0,166	11,190	16,700	11,190	6,836
2	0,366	0,040	16,700	0,040	0,010
3	0,138	0,543	16,567	0,543	0,266
4	0,393	4,847	16,567	4,847	2,690

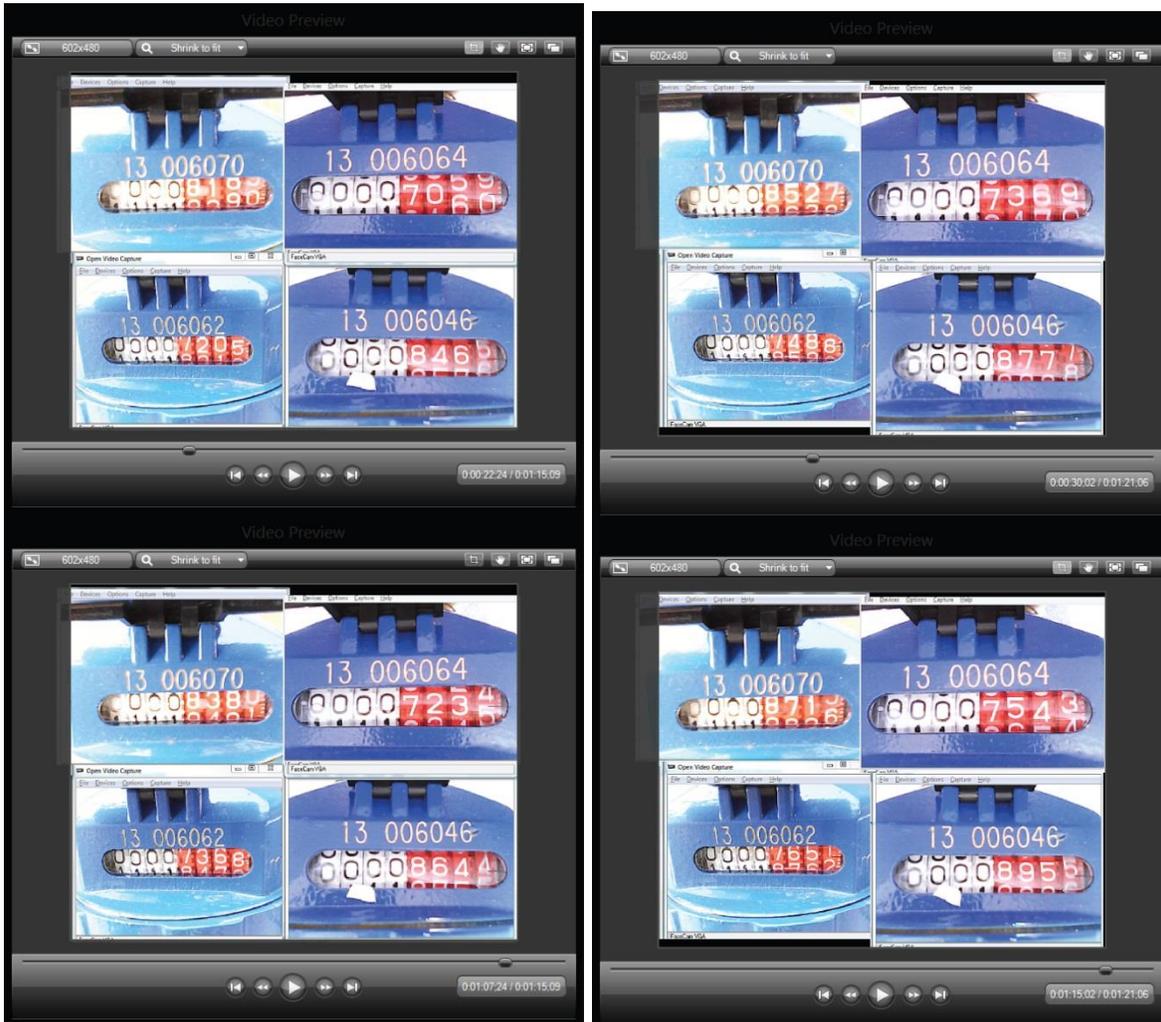
Concentración	Unidad	Valor medido	Ho	Gómez	Concentración estándar
T3	Valor (mg/L)	0,27	0,01	0,01	0,58
	Error (%)	0%	-96%	-96%	118%
T4	Valor (mg/L)	2,69	2,89	2,89	2,80
	Error (%)	0%	7%	7%	4%

ANEXO No.7 Lecturas de los medidores de agua



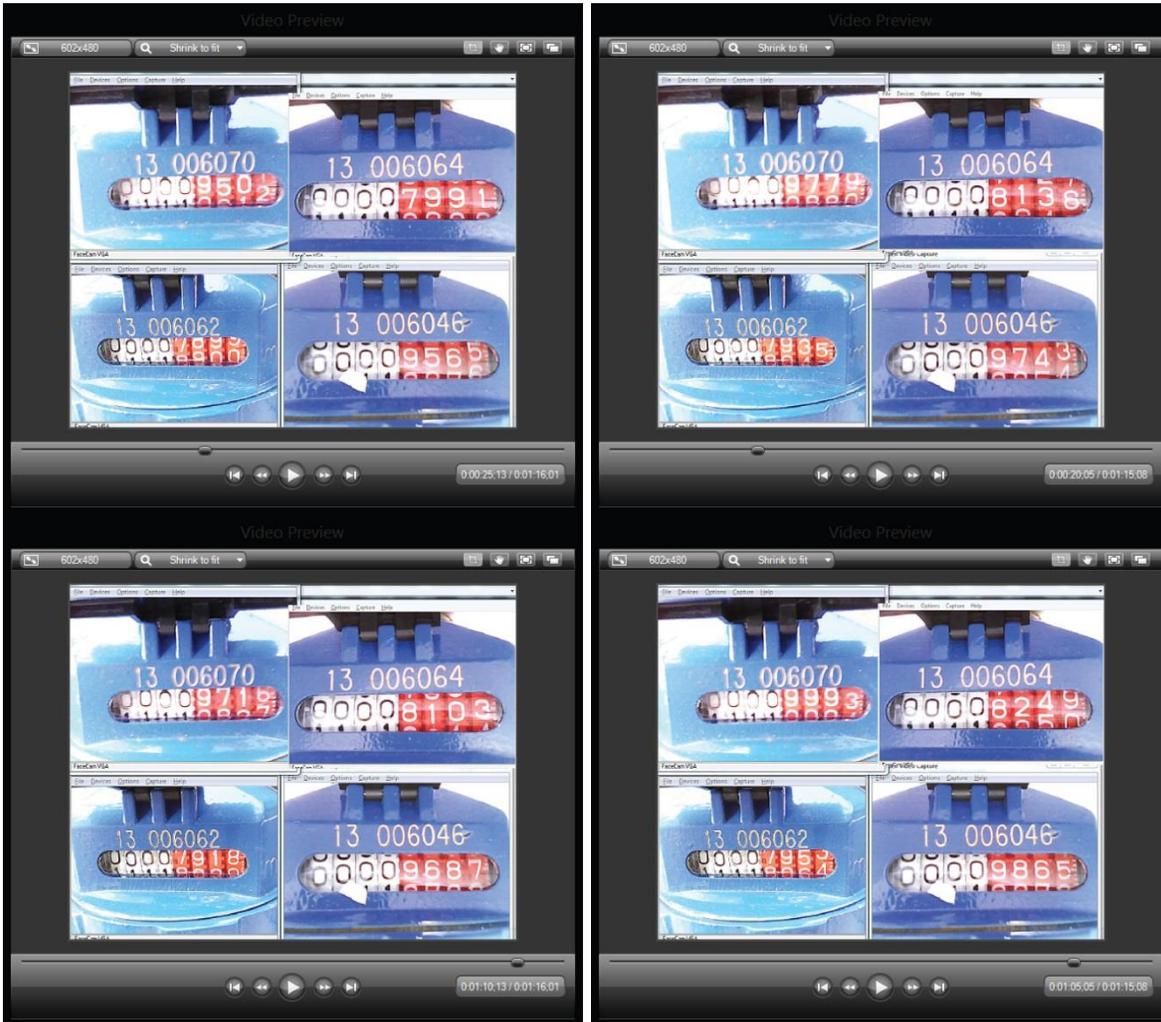


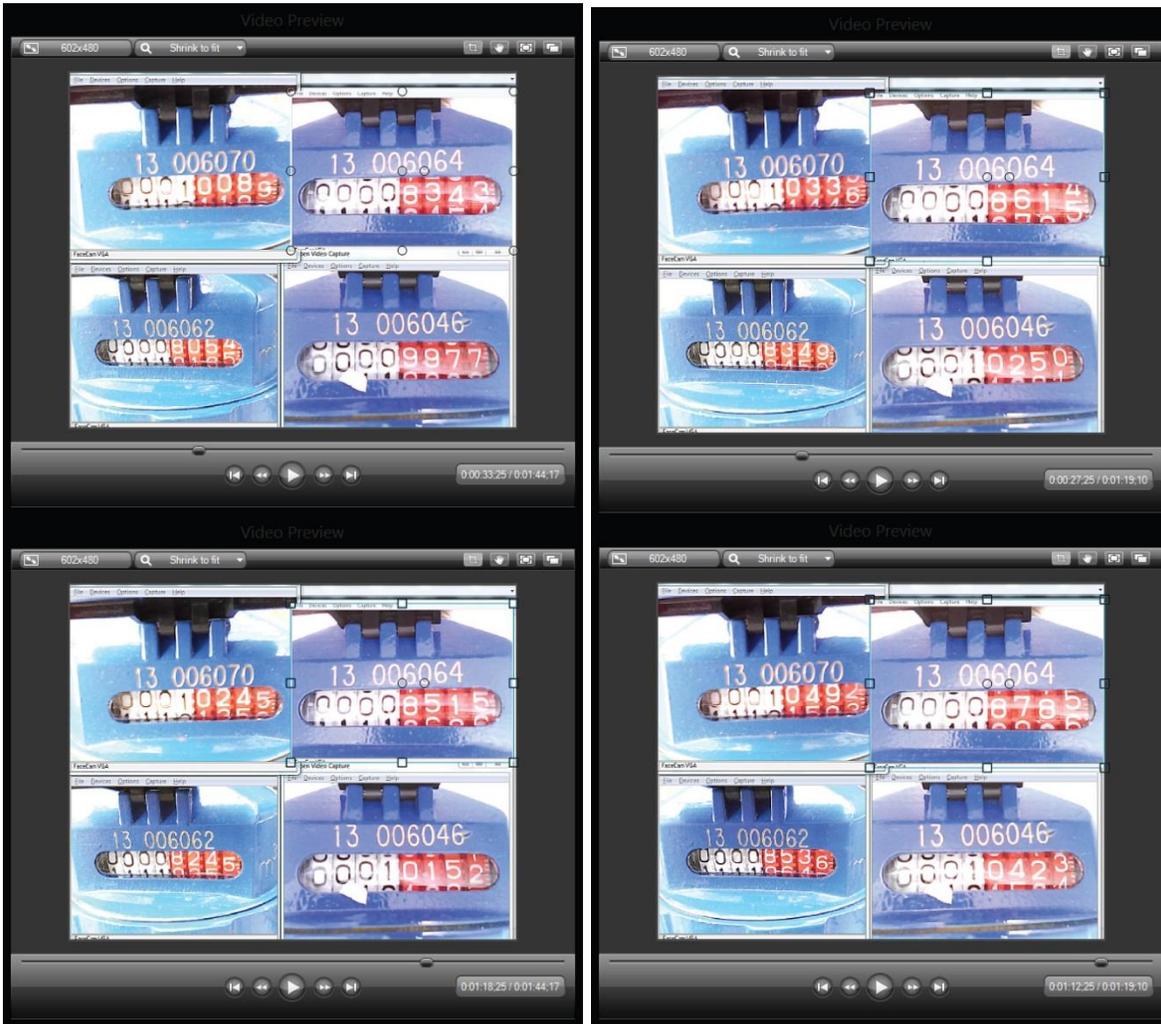


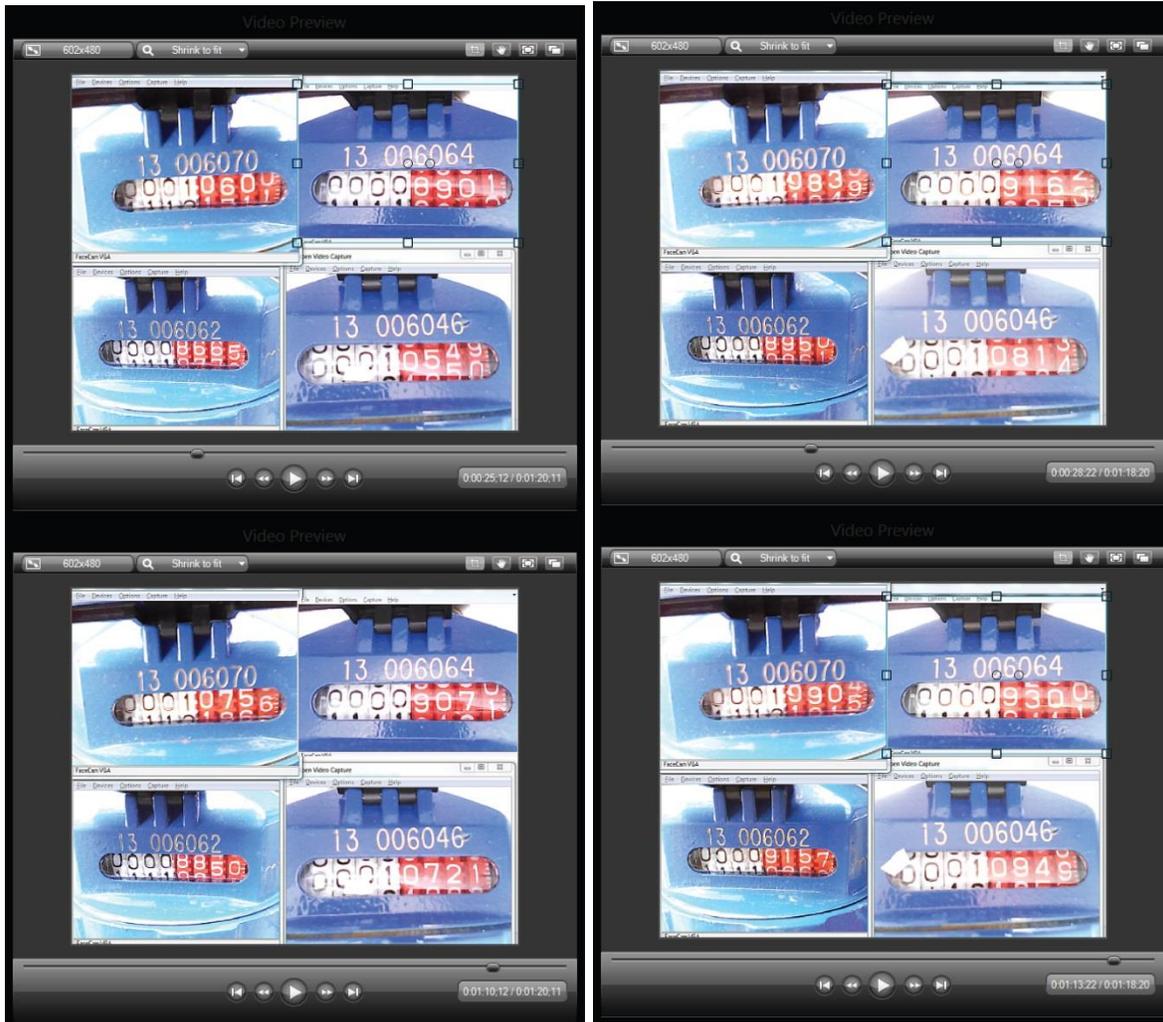


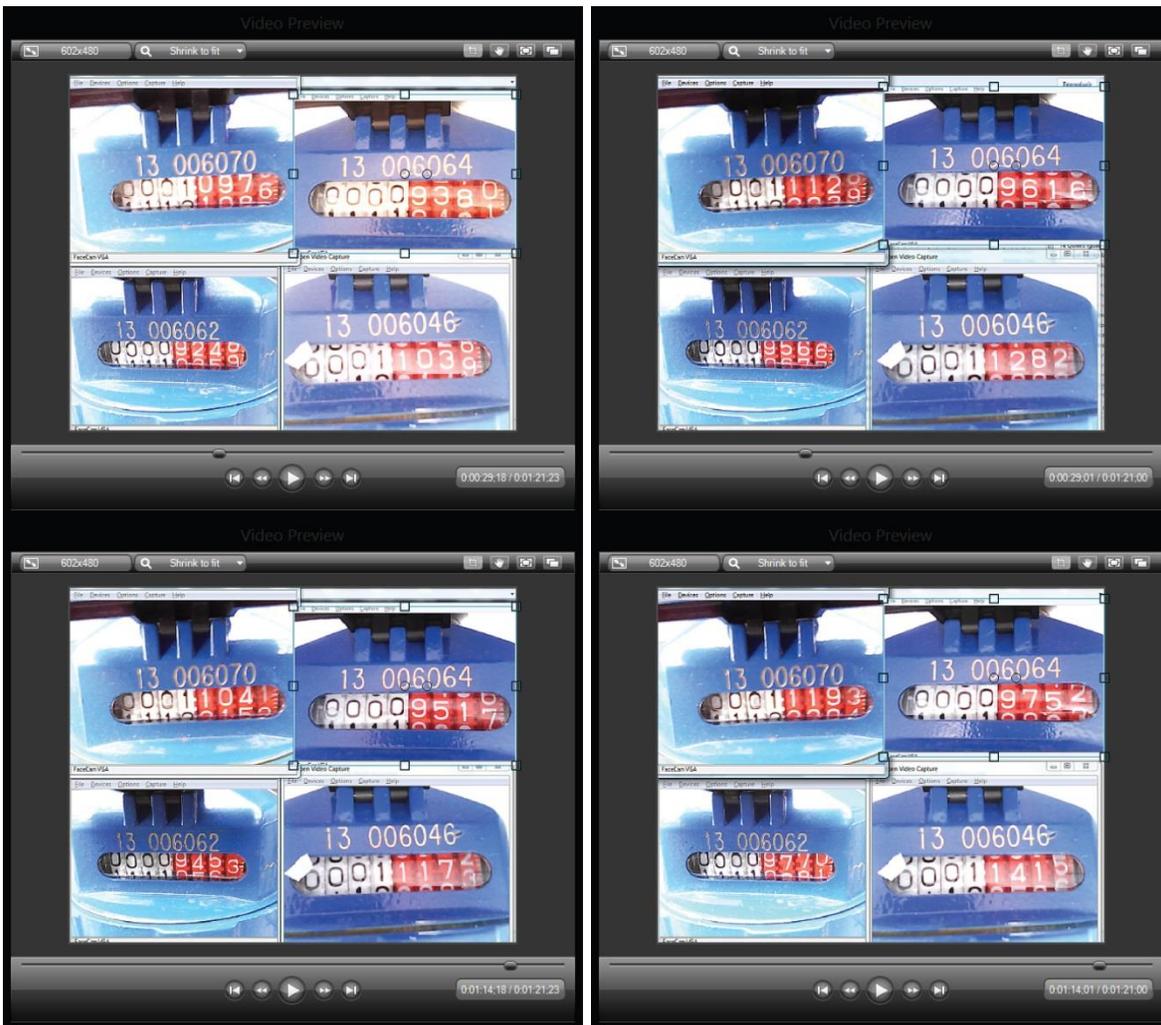


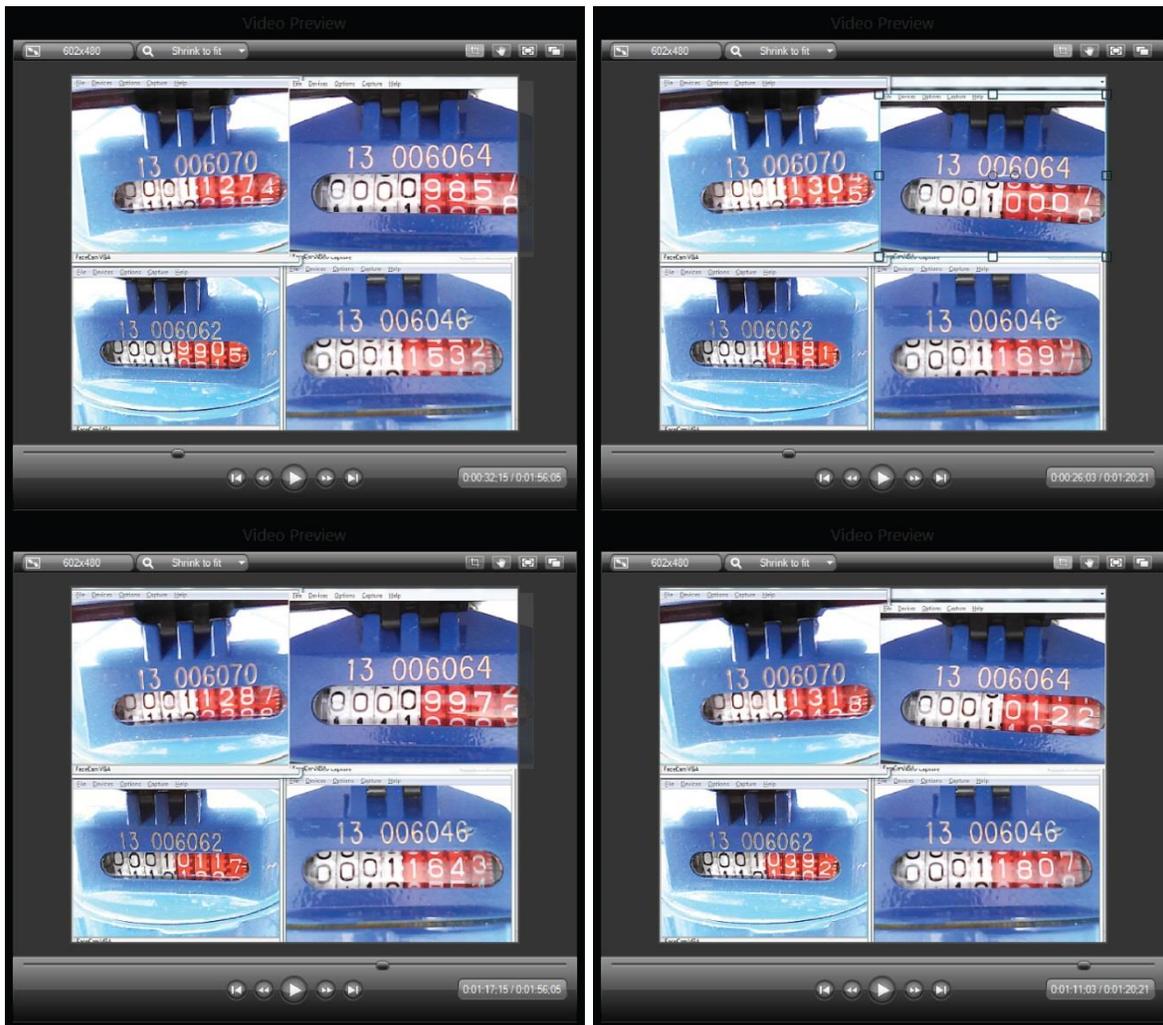




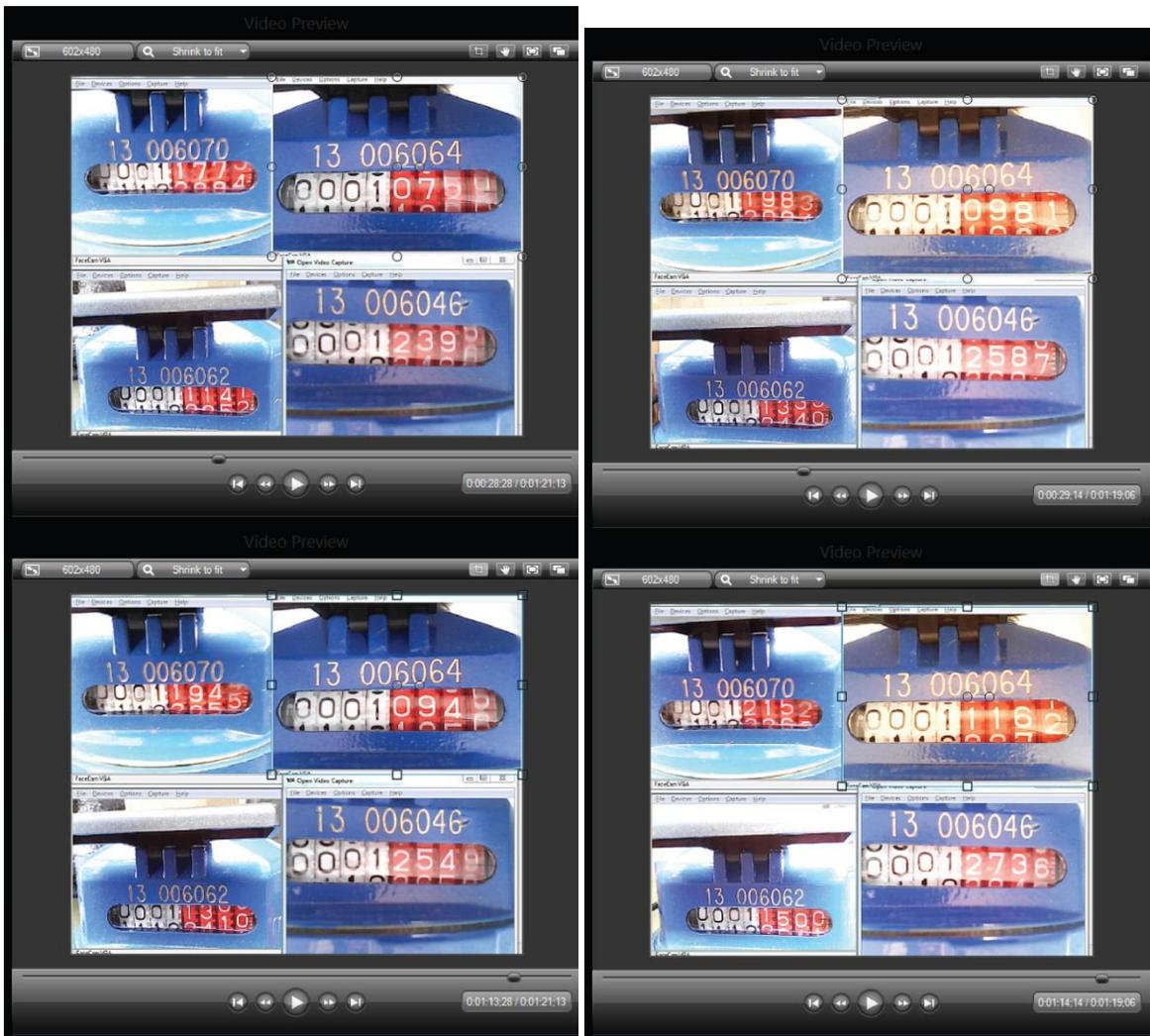


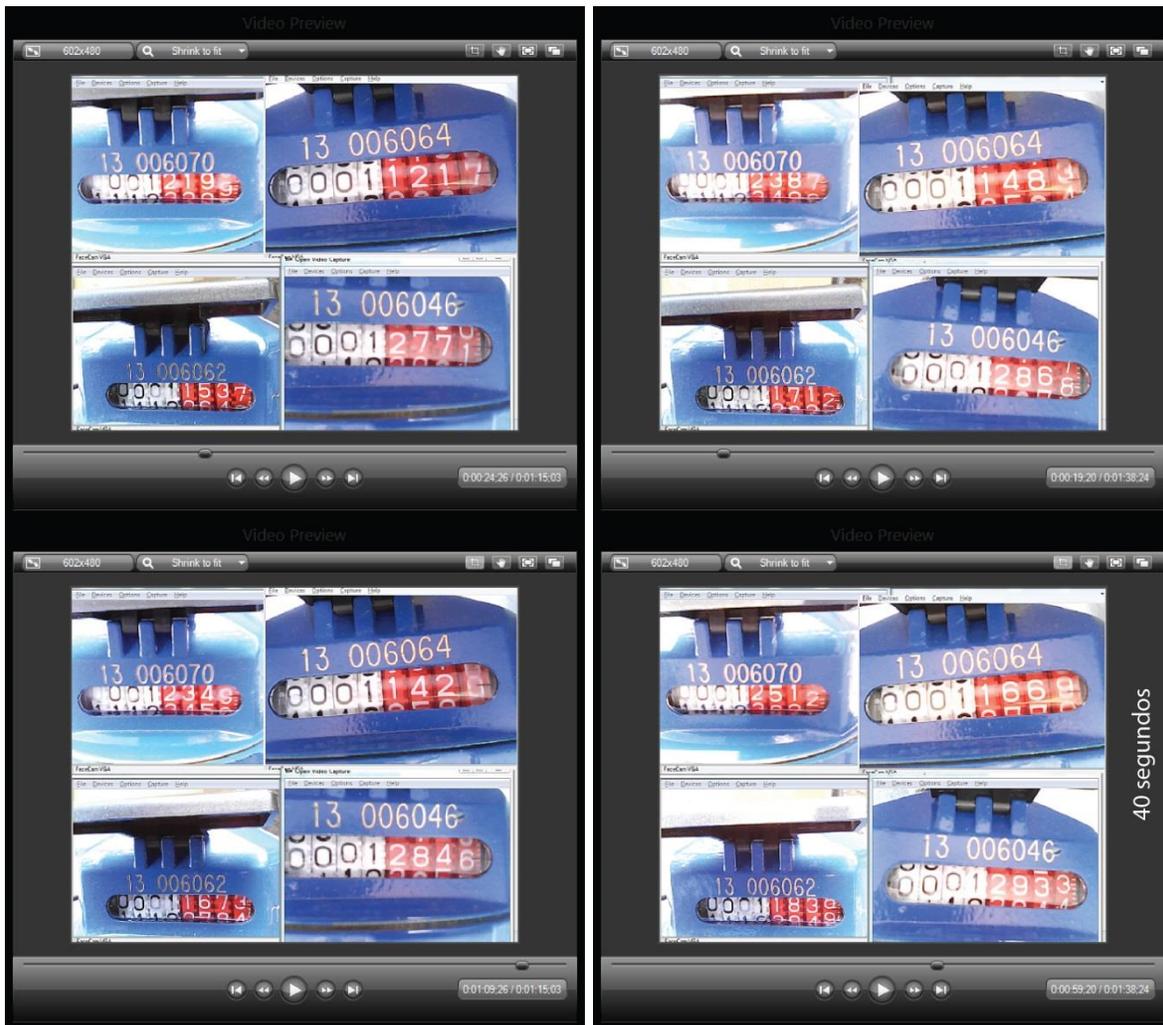




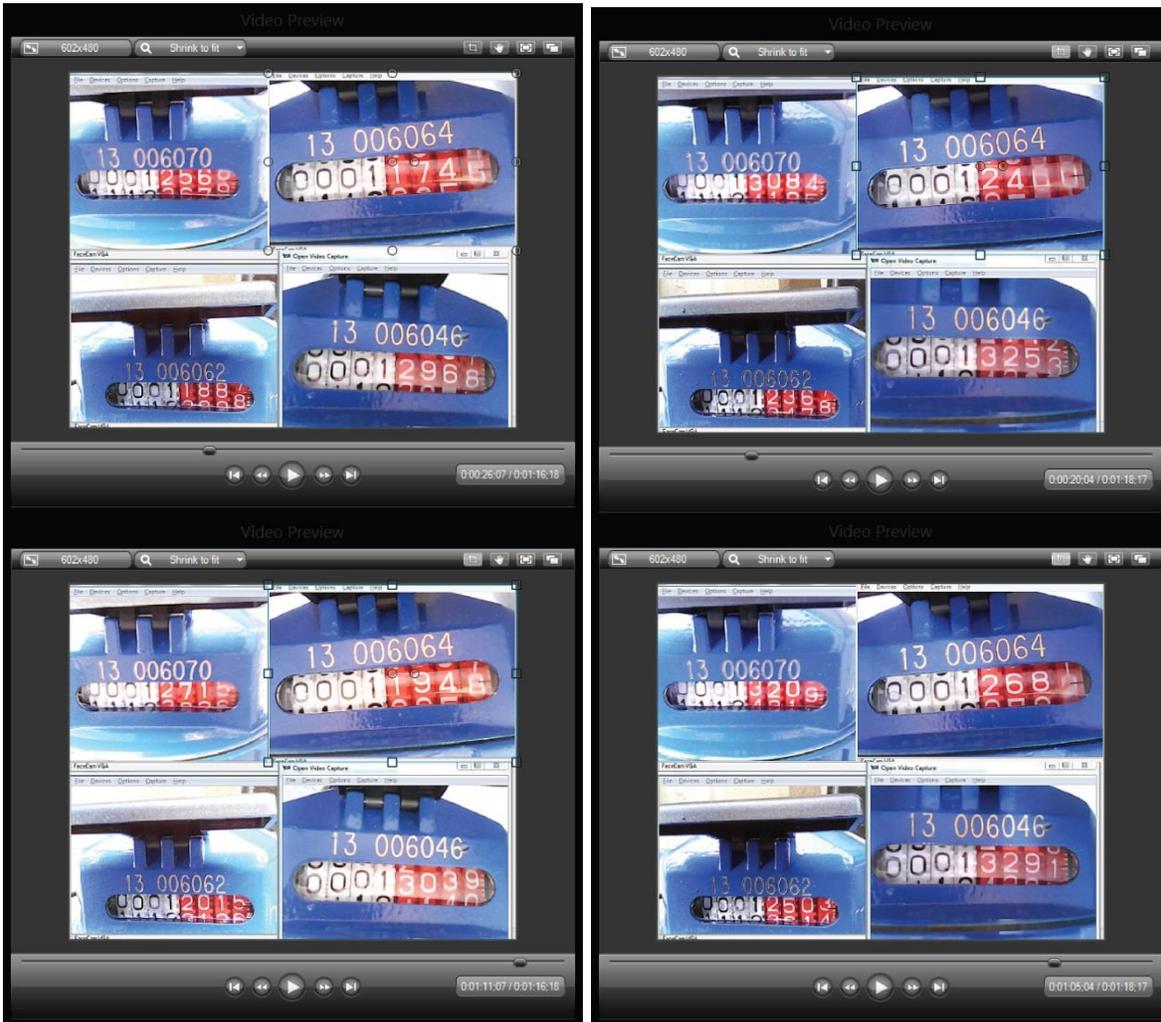


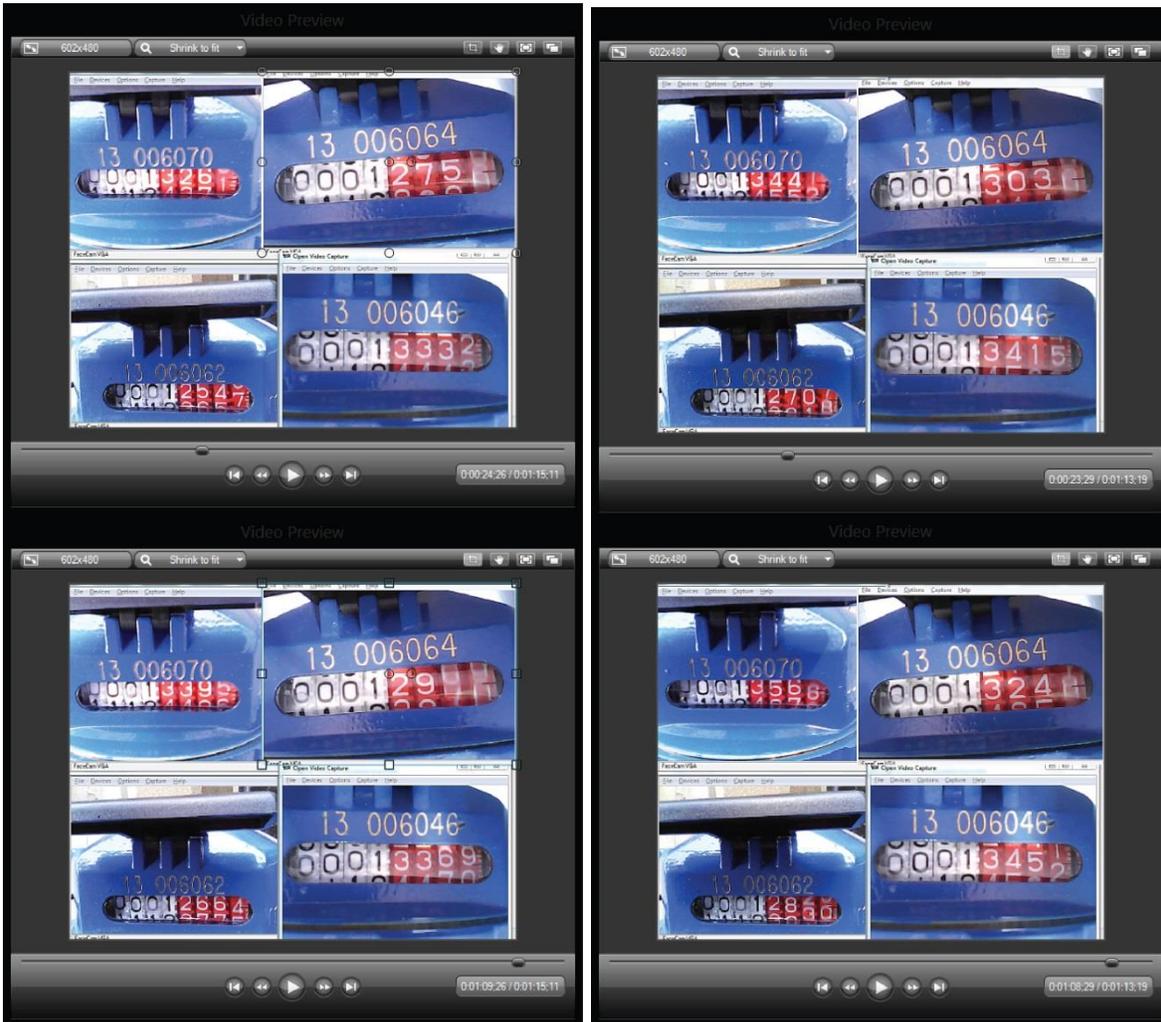


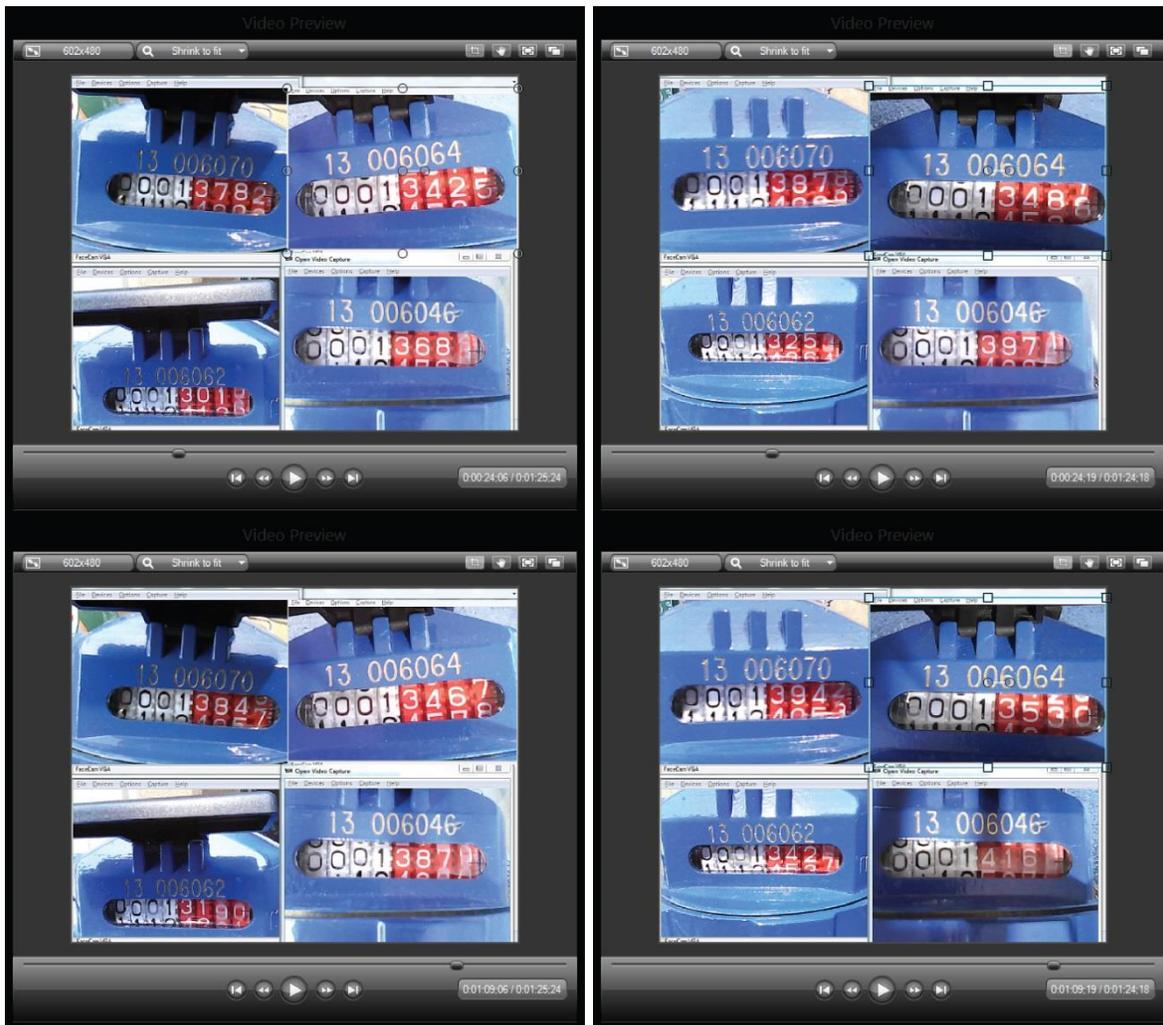


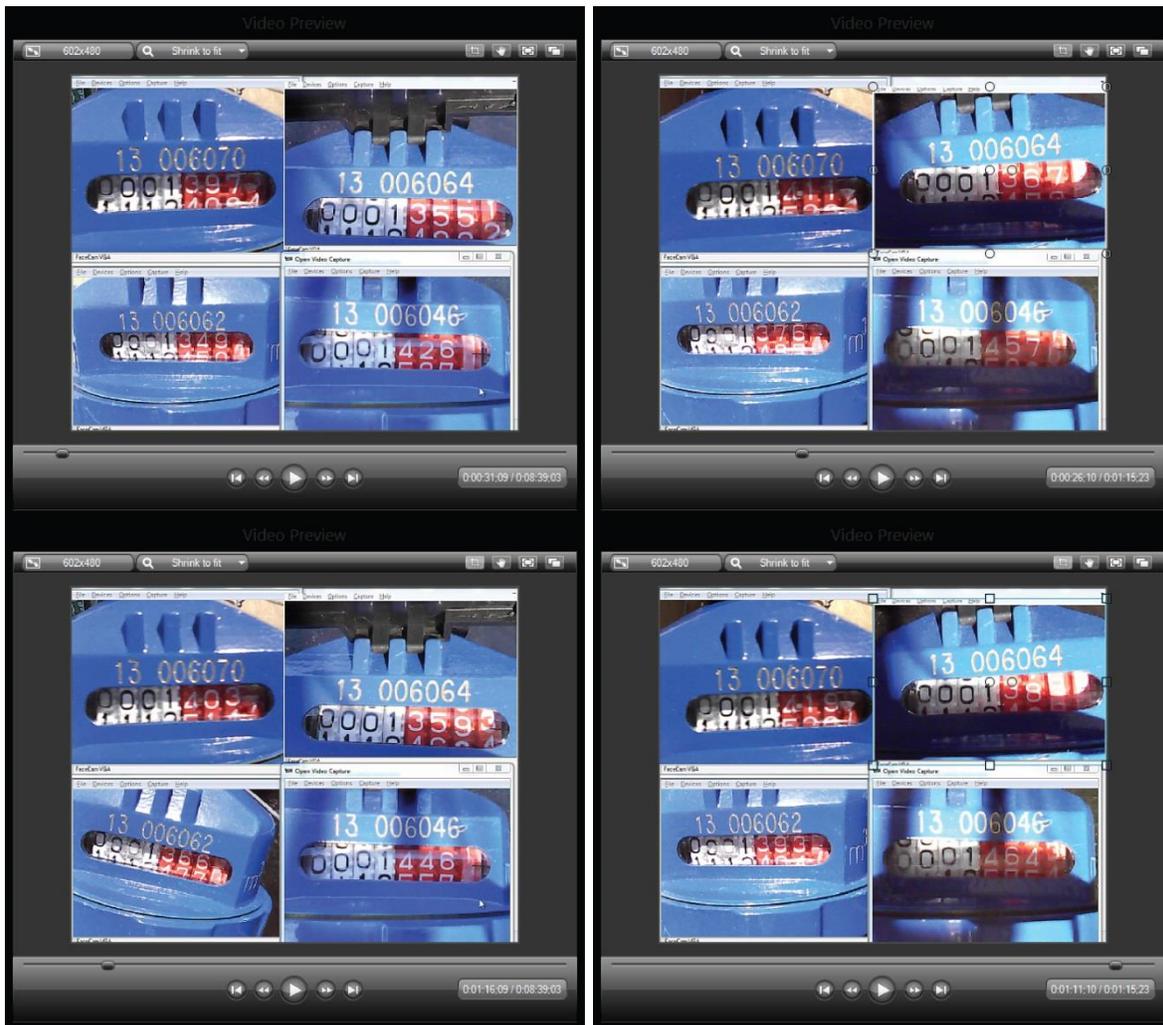


40 segundos

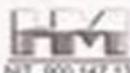








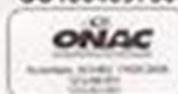
ANEXO No.8 Certificados de calibración de los medidores de agua



HIDROMETRICA SA
NIT. 900.147.131-3

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDOR No
HIDROMETRICA SA

CC1304097506



FECHA DE EMISIÓN DEL CERTIFICADO: 2013-11-14 FECHA DE CALIBRACIÓN: 2013-11-14 página 1 de 1

DATOS DEL SOLICITANTE

SOLICITANTE: IF SOLUCIONES SA NIT, RUT + CC: 900.030.300-0

DIRECCIÓN SOLICITANTE: CDA 20 # 10 - 22

DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO OBJETO DE CALIBRACIÓN

NÚMERO DE SERIAL: 13 500008 AÑO DE FABRICACIÓN: 2013
 MEDIDOR: NUVO CLASE METROLÓGICA: B 100
 MARCA: CONTRACAL CAPACIDAD MÁXIMA DE ESCALA: 9999 m³
 MODELO: CALIBRATOR 100 DIVISIÓN MÍNIMA DE LA ESCALA: 0.01 L
 TIPO: Volumétrico UNIDAD: litros

CONDICIONES DURANTE LA CALIBRACIÓN

TEMPERATURA INICIAL DEL AGUA °C: 20.45 TEMPERATURA AMBIENTE INICIAL °C: 19.36 HUMEDAD RELATIVA INICIAL %: 56.05
 TEMPERATURA FINAL DEL AGUA °C: 20.42 TEMPERATURA AMBIENTE FINAL °C: 19.15 HUMEDAD RELATIVA FINAL %: 58.52

MÉTODO DE CALIBRACIÓN	INCERTIDUMBRE	TRATAMIENTO				OBSERVACIONES
		OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	
El método utilizado es de "Comparación de volúmenes" que consiste en medir el volumen de un patrón de agua y el volumen de un medidor de agua y comparar los resultados. Este método es el más preciso y exacto de los métodos de calibración de medidores de agua.	La incertidumbre es la combinación de la incertidumbre de la medición de volumen del patrón y la incertidumbre de la medición de volumen del medidor.	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	Este certificado expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas. No puede ser reproducido total o parcialmente, excepto cuando se haya obtenido previamente permiso por escrito del laboratorio que lo emite. Los resultados obtenidos en el presente certificado, se refieren al momento y condiciones en que se realizó la calibración, y corresponden al medidor en cuestión. Hidrométrica SA se asume responsable de los patrones que profieren utilizar para el tratamiento de los instrumentos calibrados.
		OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	
		OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	
		OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	
		OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	
		OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	
		OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	
		OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	
		OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	
		OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	

RESULTADOS DE LA PRUEBA

PRUEBA	CALIBRACION DE LA PRUEBA	LECTURA INICIAL	LECTURA FINAL	VOLUMEN MARCADO MEDIDOR	VOLUMEN DEL PATRON	ERROR EN LA PRUEBA	INCERTIDUMBRE	E.E.P. %	RESULTADO DE LA CALIBRACION
Q1	38.48 L	472.88 L	428.40 L	4.07 L	4.06 L	-1.0%	±0.1%	0%	Conforme
Q2	41.35 L	417.88 L	472.84 L	4.36 L	4.36 L	0.0%	±0.1%	0%	Conforme
Q3	38.47 L	267.88 L	418.40 L	118.02 L	118.700 L	-0.5%	±0.0%	0%	Conforme

E.M.A. Error máximo permitido, numeral 3.7 de la norma NTC 1000-1-1995, numeral 5.2.2 y 5.2.4 de la norma NTC 1000-1-2007

CALIBRO

CO: 100240000

Cargo: TÉCNICO DE LABORATORIO

Fecha: 11/14/2013

REVISÓ Y AUTORIZÓ

Nombre: OLGA LUCA SANDOVAL

Cargo: JEFE DE LABORATORIO (I)

Fecha: 11/14/2013

--- FIN ---

RCM-0101-070101

Caracas 26 de ZDC - 47
Tel/Fax 3378786/3407098 Bogotá, hidrometrica@ufvivi.co

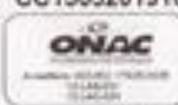
1 de 1
Mod. 10-100910



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDOR No
HIDROMETRICA SA

NET, 900.147.131-0

CC1303201910



FECHA DE EMISIÓN DEL CERTIFICADO: 2013-10-14 FECHA DE CALIBRACIÓN: 2013-10-14 Página 1 de 1

DATOS DEL SOLICITANTE

SOLICITANTE: IF SOLUCIONES SA NIT/RUT o CC: 900.090.900-5

DIRECCIÓN SOLICITANTE: CRA 25 # 18 - 23

DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO OBJETO DE CALIBRACIÓN

NÚMERO DE SERIAL: 13 00005 AÑO DE FABRICACIÓN: 2013
 MEDIDOR: NEVO CLASE METROLÓGICA: B 100
 MARCA: CONTROLO AGUA CAPACIDAD MÁXIMA DE ESCALA: 9999 m³
 MODELO: CASPT000190 DIVISIÓN MÍNIMA DE LA ESCALA: 0.02 L
 TIPO: Volumétrico DIÁMETRO: 25 mm

CONDICIONES DURANTE LA CALIBRACIÓN

TEMPERATURA INICIAL DEL AGUA °C: 21.26 TEMPERATURA AMBIENTE INICIAL °C: 17.89 HUMEDAD RELATIVA INICIAL %: 58.43
 TEMPERATURA FINAL DEL AGUA °C: 21.26 TEMPERATURA AMBIENTE FINAL °C: 17.36 HUMEDAD RELATIVA FINAL %: 58.39

MÉTODO DE CALIBRACIÓN	INCERTIDUMBRE	TRACABILIDAD	DECLARACION																																				
<p>El método aplicado es el "volumétrico" en el cual el agua que pasa a través del medidor se recoge en un recipiente y éste recipiente (cuya capacidad es determinada en condiciones similares de operación) se pesa de conformidad con el método B de la NTC 1090-2 (1998) y se compara el volumen de agua con el de un recipiente de referencia.</p> <p>$E(\%) = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \times 100$</p> <p>Nota: Este método es garantizado por el fabricante del medidor.</p>	<p>La incertidumbre es la combinación de la incertidumbre asociada con el factor de expansión (NTE 1090-2) y la incertidumbre asociada con el método de pesaje (NTE 1090-2).</p> <p>CONVENIONES</p> <p>1. Unidades: Litros, litros por hora.</p> <p>2. Sección: Control, Hidrometría.</p> <p>3. Servicio: Control, Hidrometría.</p> <p>4. Calle: Carrera 25 # 18 - 23.</p> <p>5. Hora de entrega: 8:00 a.m. a 4:00 p.m.</p> <p>6. Hora de recepción: 8:00 a.m. a 4:00 p.m.</p>	<p>ESQUEMA DE TRACABILIDAD</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>ESQUEMA</th> <th>UNIDAD</th> <th>CLASE</th> <th>ESQUEMA</th> </tr> <tr> <td>ESQUEMA 100</td> <td>mm</td> <td>B 100</td> <td>ESQUEMA 100</td> </tr> <tr> <td>ESQUEMA 100</td> <td>mm</td> <td>B 100</td> <td>ESQUEMA 100</td> </tr> <tr> <td>ESQUEMA 100</td> <td>mm</td> <td>B 100</td> <td>ESQUEMA 100</td> </tr> <tr> <td>ESQUEMA 100</td> <td>mm</td> <td>B 100</td> <td>ESQUEMA 100</td> </tr> <tr> <td>ESQUEMA 100</td> <td>mm</td> <td>B 100</td> <td>ESQUEMA 100</td> </tr> <tr> <td>ESQUEMA 100</td> <td>mm</td> <td>B 100</td> <td>ESQUEMA 100</td> </tr> <tr> <td>ESQUEMA 100</td> <td>mm</td> <td>B 100</td> <td>ESQUEMA 100</td> </tr> <tr> <td>ESQUEMA 100</td> <td>mm</td> <td>B 100</td> <td>ESQUEMA 100</td> </tr> </table>	ESQUEMA	UNIDAD	CLASE	ESQUEMA	ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100	ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100	ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100	ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100	ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100	ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100	ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100	ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100	<p>Este certificado es válido para el funcionamiento del medidor en las condiciones de operación para las cuales fue diseñado y homologado. El medidor debe ser utilizado de acuerdo con el manual de instrucciones que lo acompaña.</p> <p>Este certificado expresa solamente el resultado de las mediciones realizadas.</p> <p>No puede ser reproducido total o parcialmente, excepto con el consentimiento por escrito de Hidrométrica SA.</p> <p>Los resultados obtenidos en el presente certificado, se obtuvieron en las condiciones en que se realizó la calibración y corresponden al medidor en cuestión.</p> <p>Hidrométrica SA no es responsable de los resultados que suryan de la operación del presente medidor en condiciones diferentes a las de calibración.</p>
ESQUEMA	UNIDAD	CLASE	ESQUEMA																																				
ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100																																				
ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100																																				
ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100																																				
ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100																																				
ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100																																				
ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100																																				
ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100																																				
ESQUEMA 100	mm	B 100	ESQUEMA 100																																				

RESUMEN DE LA PRUEBA

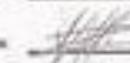
PRUEBA	CANTIDAD PROMEDIO DE LA PRUEBA	LECTURA INICIAL	LECTURA FINAL	VOLUMEN INDICADO MEDIDOR	VOLUMEN DEL PATRON	ERROR EN LA PRUEBA	INCERTIDUMBRE	E.M.P. %	RESULTADO DE LA CALIBRACION
Q1	21.05 LN	375.86 L	380.57 L	4.81 L	4.985 L	-0.71%	±0.11%	97%	Conforme
Q2	46.00 LN	375.28 L	375.28 L	0.07 L	4.985 L	0.10%	±0.18%	97%	Conforme
Q3	3692.32 LN	274.37 L	375.02 L	100.65 L	96.990 L	-0.42%	±0.02%	97%	Conforme

E.M.P. (Error máximo permitido, numeral 5.1 de la norma NTC 1090-2 (1998), numeral 5.2.3 y 5.2.4 de la norma NTC 1090-1 (2007))

CALIBRO

CC: 900.090.900-5

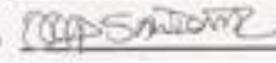
Cargo: TÉCNICO DE LABORATORIO

Firma: 

REVISÓ Y AUTORIZÓ

Nombre: OLGA LUCIA SANDOVAL

Cargo: JEFE DE LABORATORIO (S)

Firma: 

- FIN -

RCM-0101-070101

Tel/Fax: 3179190/3427068 Bogotá, hidrometrica@yaho.com

Carrera 26 No 20C - 47

1 de 1

Mol 10-130910



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDOR No
HIDROMETRICA SA

NET. 900.147.131-3

CC1303201904



FECHA DE EMISIÓN DEL CERTIFICADO: 2019-11-14 FECHA DE CALIBRACIÓN: 2019-11-14 Página 1 de 1

DATOS DEL SOLICITANTE

SOLICITANTE: AF SOLUCIONES S.A. ML, RUT y CC: 862.030.560-5

DIRECCIÓN SOLICITANTE: CRA 23 # 13 - 22

DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO OBJETO DE CALIBRACIÓN

NÚMERO DE SERIAL: 13 300004 AÑO DE FABRICACIÓN: 2013

MEDIDOR: NUOVO CLASE METROLÓGICA: B 100

MARKA: CONTINENTAL CAPACIDAD MÁXIMA DE ESCALA: 9999 m³

MODELO: CAVITATION DIVISIÓN MÍNIMA DE LA ESCALA: 0,02 L

TIPO: VOLUMENICO DIÁMETRO: 25 mm

CONDICIONES DURANTE LA CALIBRACIÓN

TEMPERATURA INICIAL DEL AGUA °C: 21,06 TEMPERATURA AMBIENTE INICIAL °C: 17,89 HUMEDAD RELATIVA INICIAL %: 56,43

TEMPERATURA FINAL DEL AGUA °C: 21,06 TEMPERATURA AMBIENTE FINAL °C: 17,38 HUMEDAD RELATIVA FINAL %: 56,39

MÉTODO DE CALIBRACIÓN	INCERTIDUMBRE	TRAZADO	OBSERVACIONES																																								
<p>El método utilizado es el "volumétrico" en el cual se mide una muestra de volumen del líquido, se mide el peso a una temperatura y luego se determina su densidad correspondiente de acuerdo al peso de volumen del correspondiente líquido, así se calcula el volumen de calibración en litros de acuerdo al peso de calibración en gramos y la densidad del líquido en g/cm³.</p> <p>EN (%) = $\frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100$</p> <p>EN: Error relativo en porcentaje. ENL: Incertidumbre estándar en lectura. ENR: Incertidumbre estándar en volumen.</p>	<p>La incertidumbre de medición es la combinación de la incertidumbre de los estándares de volumen y de peso, la incertidumbre de la densidad del líquido, la incertidumbre de la temperatura del líquido y la incertidumbre de la densidad del líquido.</p> <p>CONVERSIONES</p> <p>1 litro = 1000 cm³</p> <p>1 cm³ = 1 ml</p> <p>1 m³ = 1000 litros</p> <p>1 litro = 1000 ml</p> <p>1 ml = 1000 microlitros</p>	<p>TRAZADO</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>TRAZADO</th> <th>TRAZADO</th> <th>TRAZADO</th> <th>TRAZADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TRAZADO 1000</td> <td>TRAZADO 1000</td> <td>TRAZADO 1000</td> <td>TRAZADO 1000</td> </tr> <tr> <td>TRAZADO 2000</td> <td>TRAZADO 2000</td> <td>TRAZADO 2000</td> <td>TRAZADO 2000</td> </tr> <tr> <td>TRAZADO 3000</td> <td>TRAZADO 3000</td> <td>TRAZADO 3000</td> <td>TRAZADO 3000</td> </tr> <tr> <td>TRAZADO 4000</td> <td>TRAZADO 4000</td> <td>TRAZADO 4000</td> <td>TRAZADO 4000</td> </tr> <tr> <td>TRAZADO 5000</td> <td>TRAZADO 5000</td> <td>TRAZADO 5000</td> <td>TRAZADO 5000</td> </tr> <tr> <td>TRAZADO 6000</td> <td>TRAZADO 6000</td> <td>TRAZADO 6000</td> <td>TRAZADO 6000</td> </tr> <tr> <td>TRAZADO 7000</td> <td>TRAZADO 7000</td> <td>TRAZADO 7000</td> <td>TRAZADO 7000</td> </tr> <tr> <td>TRAZADO 8000</td> <td>TRAZADO 8000</td> <td>TRAZADO 8000</td> <td>TRAZADO 8000</td> </tr> <tr> <td>TRAZADO 9000</td> <td>TRAZADO 9000</td> <td>TRAZADO 9000</td> <td>TRAZADO 9000</td> </tr> </tbody> </table>	TRAZADO	TRAZADO	TRAZADO	TRAZADO	TRAZADO 1000	TRAZADO 1000	TRAZADO 1000	TRAZADO 1000	TRAZADO 2000	TRAZADO 2000	TRAZADO 2000	TRAZADO 2000	TRAZADO 3000	TRAZADO 3000	TRAZADO 3000	TRAZADO 3000	TRAZADO 4000	TRAZADO 4000	TRAZADO 4000	TRAZADO 4000	TRAZADO 5000	TRAZADO 5000	TRAZADO 5000	TRAZADO 5000	TRAZADO 6000	TRAZADO 6000	TRAZADO 6000	TRAZADO 6000	TRAZADO 7000	TRAZADO 7000	TRAZADO 7000	TRAZADO 7000	TRAZADO 8000	TRAZADO 8000	TRAZADO 8000	TRAZADO 8000	TRAZADO 9000	TRAZADO 9000	TRAZADO 9000	TRAZADO 9000	<p>El método B.1, para asignar el certificado de la conformidad de los patrones de referencia del laboratorio con los correspondientes patrones nacionales e internacionales, debe ser acompañado y cubierto con evidencia al Instituto Nacional de Metrología (INM) en el momento correspondiente.</p> <p>Este certificado expresa fehacientemente el resultado de las mediciones realizadas.</p> <p>Se puede ser reproducido con el consentimiento expreso, cuando se haga mención explícitamente por escrito del laboratorio que lo emite.</p> <p>Los resultados obtenidos en el presente certificado, se refieren al momento y condiciones en que se realizó la calibración, y corresponden al estado de los patrones, instrumentos de medida y procedimientos de los patrones que se utilizaron durante el uso intencional de los instrumentos calibrados.</p>
TRAZADO	TRAZADO	TRAZADO	TRAZADO																																								
TRAZADO 1000	TRAZADO 1000	TRAZADO 1000	TRAZADO 1000																																								
TRAZADO 2000	TRAZADO 2000	TRAZADO 2000	TRAZADO 2000																																								
TRAZADO 3000	TRAZADO 3000	TRAZADO 3000	TRAZADO 3000																																								
TRAZADO 4000	TRAZADO 4000	TRAZADO 4000	TRAZADO 4000																																								
TRAZADO 5000	TRAZADO 5000	TRAZADO 5000	TRAZADO 5000																																								
TRAZADO 6000	TRAZADO 6000	TRAZADO 6000	TRAZADO 6000																																								
TRAZADO 7000	TRAZADO 7000	TRAZADO 7000	TRAZADO 7000																																								
TRAZADO 8000	TRAZADO 8000	TRAZADO 8000	TRAZADO 8000																																								
TRAZADO 9000	TRAZADO 9000	TRAZADO 9000	TRAZADO 9000																																								

RESULTADOS DE LA PRUEBA

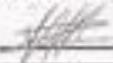
PRUEBA	CAUDAL PROMEDIO DE LA PRUEBA	LECTURA INICIAL	LECTURA FINAL	VOLUMEN INDICADO MEDIDOR	VOLUMEN DEL PATRÓN	ERROR EN LA PRUEBA	INCERTIDUMBRE	E.M.P. %	RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN
Q1	27,05 L/s	343,32 L	344,25 L	8,93 L	8,945 L	-0,31%	±0,11%	97%	Conforme
Q2	48,00 L/s	337,98 L	342,92 L	4,94 L	4,955 L	-0,50%	±0,18%	92%	Conforme
Q3	39,05 L/s	342,08 L	337,73 L	5,35 L	5,355 L	-0,42%	±0,22%	97%	Conforme

E.M.P. Error máximo permitido, definido en la norma NTC 1360-1:1995, numeral 5.2.3 y 5.2.4 de la norma NTC 1360-1:2001. Conforme

EMISOR

CC: 33004999

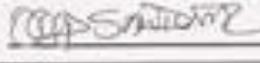
Cargo: TÉCNICO DE LABORATORIO

Firma: 

REVISÓ Y AUTORIZÓ

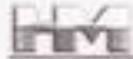
Nombre: OLGA LUCIA SANDOVAL

Cargo: JEFE DE LABORATORIO (J)

Firma: 

— FM —

Carrera 26 No 220 - 47 Tel/Fax: 3378766/3407099 Bogotá, hidrometrica@ufbo.edu.co 1 de 1 Mes/10-130910


CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDOR No **CC1303201907**
HIDROMETRICA SA



NIT. 900.147.131-3 Página 1 de 1

FECHA DE EMISIÓN DEL CERTIFICADO: 2013-01-14 FECHA DE CALIBRACIÓN: 2013-01-14

DATOS DEL SOLICITANTE

SOLICITANTE: IF SOLUCIONES S.A. NIT, RUT o CC: 800.000.000-0
 DIRECCIÓN SOLICITANTE: CBA 26 # 18 - 33

DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO OBJETO DE CALIBRACIÓN

NÚMERO DE SERIAL: 13300270 AÑO DE FABRICACIÓN: 2013
 MEDIDOR: NUOVO CLASE METROLÓGICA: R 100
 MARCA: CONTROLAGUA CAPACIDAD MÁXIMA DE ESCALA: 9999 L³
 MODELO: CANISTORINO DIVISIÓN MÍNIMA DE LA ESCALA: 0.02 L
 TIPO: Volumétrico DIÁMETRO: 25 mm

CONDICIONES DURANTE LA CALIBRACIÓN

TEMPERATURA INICIAL DEL AGUA °C: 21.06 TEMPERATURA AMBIENTE INICIAL °C: 17.39 HUMEDAD RELATIVA INICIAL %: 58.43
 TEMPERATURA FINAL DEL AGUA °C: 21.06 TEMPERATURA AMBIENTE FINAL °C: 17.39 HUMEDAD RELATIVA FINAL %: 58.28

MÉTODO DE CALIBRACIÓN	INCERTIDUMBRE	TRAZAMIENTO	SEALABORACIÓN
Se realizó utilizando la Norma NTC 1060-1:1999, la cual establece el método de calibración de medidores volumétricos de agua en condiciones de laboratorio.	La incertidumbre (U) reportada, se la estimó considerando el método de propagación de incertidumbres, con un factor de cobertura (k=2), con lo cual se logra un nivel de confianza del 95%.	Se utilizó el método de calibración por el volumen de agua medido en el patrón.	Se realizó en el laboratorio de Hidrométrica S.A., para asegurar el cumplimiento de la exactitud de los patrones de referencia del laboratorio con los correspondientes patrones nacionales e internacionales, entre sus instrumentos y patrones para calibración al Instituto Nacional de Metrología (INM) en el laboratorio acreditado.
$E(\%) = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \times 100$	± 0.001 L (k=2)	1000 L ± 0.001 L 500 L ± 0.0005 L 250 L ± 0.00025 L 125 L ± 0.000125 L	Este certificado expresa fehacientemente el resultado de las mediciones realizadas.
Este certificado es válido por un periodo de 12 meses contados a partir de la fecha de emisión del mismo.	± 0.001 L (k=2)	1000 L ± 0.001 L 500 L ± 0.0005 L 250 L ± 0.00025 L 125 L ± 0.000125 L	Este resultado obtenido en el presente certificado, se refiere al momento y condiciones en que se realizó la calibración, y corresponde al estado en el momento de la calibración.

RESULTADOS DE LA PRUEBA

PRUEBA	CAUDAL PROMEDIO DE LA PRUEBA	LECTURA INICIAL	LECTURA FINAL	VOLUMEN INDICADO MEDIDOR	VOLUMEN DEL PATRÓN	ERRORES EN LA PRUEBA	INCERTIDUMBRE	E.M.P. %	RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN
C01	27.08 L/s	402.26 L	407.19 L	4.93 L	4.945 L	-0.20%	±0.11%	85%	Confirma
C02	46.00 L/s	298.90 L	407.96 L	4.96 L	4.965 L	0.20%	±0.18%	87%	Confirma
C03	30.00 L/s	304.19 L	398.68 L	94.49 L	94.000 L	-0.51%	±0.00%	82%	Confirma

E.M.P. (Error máximo permitido, numeral 5.1 de la norma NTC 1060-1:1999, numeral 5.2.3 y 5.2.4 de la norma NTC 1060-1:2007) - Confirma

CALIBRO

CC: SECHIBONE

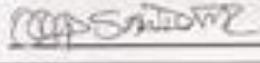
Cargo: TÉCNICO DE LABORATORIO

Firma: 

REVISÓ Y AUTORIZÓ

Nombre: OLGA LUCÍA SANDOVAL

Cargo: JEFE DE LABORATORIO (S)

Firma: 

- FIN -

Carrera 26 No 22C - 47 1 de 1
 Tel/Fax: 3378796/3421066 (Bogotá, Hidrométrica@ufpoco.es Mail: 10-130910

CERTIFICADO DE CALIBRACION

Calibration Certificate

Número: **TE-0022-10**

Number

EMITIDO BAJO NORMA

Has been assessed in accordance with the standard
NTC/ISO/IEC 17025

LABORATORIO DE TEMPERATURA

Temperature Laboratory

INSTRUMENTO:

Instrument

Termómetro de Líquido en Vidrio

FABRICANTE:

Manufacturer

COLE PARMER

MODELO:

Type

WI2

NÚMERO DE SERIE:

Serial Number

0829 22 7

IDENTIFICACIÓN:

Identification

T1

SOLICITANTE:

Customer

FF SOLUCIONES S.A.

DIRECCIÓN / CIUDAD:

Address/City

Carrera 25 No. 18 - 23, Bogotá D.C.

FECHA DE RECEPCIÓN:

Reception Date

2010-01-07

FECHA DE CALIBRACIÓN:

Calibration Date

2010-01-13

NÚMERO DE PÁGINAS DE ESTE REPORTE INCLUYENDO ANEXOS:

Number of pages of this report and Documents Attached

3

PREZ: 100009-TE001

Los resultados del presente reporte se refieren al dispositivo relacionado y al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. Metrocal Ltda no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento.

The results of this report refer to related dispositive and the moment and conditions in which the measurements were made. Metrocal Ltda assumes no responsibility for damage ensuing of this instrument.

Este reporte solo puede ser reproducido en forma total con la debida autorización por escrito de Metrocal Ltda.

This report shall not be reproduced, except in full, without the written approval of Metrocal Ltda.

Fecha de emisión
 Issuance Date

2010-01-19

Sello
 Label

Firma Autorizada
 Approved Signature

Ing. Rodolfo Ortega Acosta.
 Gerente Técnico
 Technical Manager



CERTIFICADO DE CALIBRACION

Calibration Certificate

Número: **TE-0022-10**

Number



DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO - Description of Instrument :

Rango de Calibración: 0,0 °C a 30,0 °C
División de escala/Resolución: 0,1 °C
Tipo de inmersión: Parcial

MÉTODO - Method:

Comparación directa de las indicaciones del instrumento a calibrar con el patrón. Según lo establecido en el procedimiento interno P-TE001, el cual se encuentra basado en la Norma NTC 2491 Termómetros de vidrio para laboratorio, y Procedimiento TH-004 para la calibración de termómetros de columna de líquido de inmersión total del Centro Español de Metrología (CEM)

Profundidad de Inmersión del bulbo (mm): 76

SITIO DE MEDICIÓN - Measurement place:

Laboratorio de Temperatura, MetroCal Ltda.

CONDICIONES AMBIENTALES - Ambient conditions:

Las condiciones Ambientales durante la calibración del instrumento fueron las siguientes :

Temperatura : (22,8 ± 0,4) °C
Humedad relativa : (45 ± 4) % HR

RESULTADOS DE LA MEDICIÓN - Measurement results:

Tabla No. 1

Indicación Promedio Patrón (°C)	Indicación equipo sumergido a inmersión parcial (°C)	Corrección del equipo sumergido a inmersión parcial (°C)	Incertidumbre (°C)
0,1	-0,5	0,6	± 0,51
4,9	4,6	0,3	± 0,18
10,0	9,7	0,3	± 0,18
15,0	14,8	0,2	± 0,18
20,0	19,9	0,1	± 0,18
25,2	25,1	0,1	± 0,18
30,0	29,9	0,1	± 0,18

Temperatura correcta: Indicación Promedio Instrumento + corrección

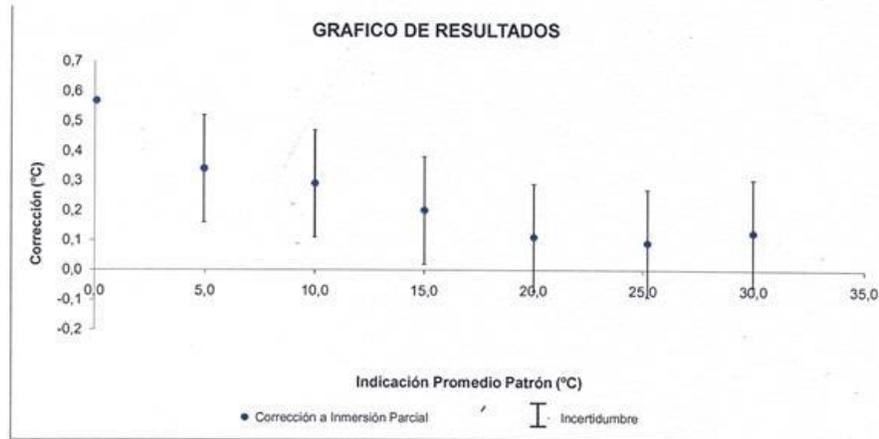
La corrección del equipo sumergido a inmersión parcial aplica cuando el termómetro se utiliza a una profundidad de 76 mm

CERTIFICADO DE CALIBRACION

Calibration Certificate

Número: **TE-0022-10**
 Number

Cu
MetroCal Ltda
 Metrología y Calibración



INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN - Measurement uncertainty:

La incertidumbre estimada en el proceso de calibración (ver tabla No. 1) se ha evaluado teniendo en cuenta la incertidumbre estándar combinada con las siguientes contribuciones: repetibilidad, patrón, resolución, estabilidad del medio de calibración, uniformidad del medio de calibración, columna emergente; esta incertidumbre fue expandida por un factor de cobertura $k = 2$, que garantiza un nivel de confianza del 95,45% obedeciendo una distribución normal.

La incertidumbre se estimó siguiendo los lineamientos expuestos en el procedimiento interno P-GM006.

TRAZABILIDAD - Traceability:

MetroCal garantiza la trazabilidad de los patrones utilizados en estas mediciones hacia patrones nacionales o internacionales.

PATRONES UTILIZADOS - Standards used

Equipo	Marca	Modelo	Código	Certificado No.	Trazabilidad
Termómetro Digital con Termoresistencia Pt-100	NewPort	INFT-0000-RTD2F/E	TE-001	18490	SIC

OBSERVACIONES - Comments:

El usuario es responsable del control de sus instrumentos a intervalos apropiados.
 Se adjunta estampilla.

FINAL DE ESTE CERTIFICADO

Cra. 29 No. 39-43 Tels.: (571) 269 5099 - 269 1594 - 269 8640 / Fax: (571) 244 3732 / Cel.: 311 276 1355, Bogotá D.C.
 Cra. 46 No. 70-135, L. 4 y 5 C.C. Suri, Telefax: (075) 369 3415 - 319 83 63 / Cel.: 310 874 5447, Oficina Barranquilla
 www.metrocalltda.com

Página 3 de 3