

**SIMULACIÓN DE LA ESTABILIDAD QUÍMICA DEL AGUA EN LAS PLANTAS DE
POTABILIZACIÓN ABASTECIDAS POR EL RÍO CAUCA EN EL MUNICIPIO DE CALI –
COLOMBIA, MEDIANTE EL MODELO HIDROGEOQUÍMICO PHREEQC.**



Por:

**LARRY MATEO RAMÍREZ CASTRO - 1531767
GILDARDO ESTEBAN SÁNCHEZ GARCÍA - 1525806**

Directores:

**Química MSc. LUZ EDITH BARBA HO
Profesora titular – Universidad del Valle**

**Ingeniero MSc. CAMILO HERNAN CRUZ VELEZ
Profesor asociado – Universidad del Valle**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE – EIDENAR
INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2021**

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
3. JUSTIFICACIÓN	3
4. OBJETIVOS.....	4
4.1. Objetivo general	4
4.2. Objetivos específicos.....	4
5. MARCO DE REFERENCIA.....	5
5.1. Marco contextual	5
5.2. Marco teórico.....	6
5.2.1. Potabilización del agua	6
5.2.2. Estabilización	6
5.2.3. Corrosión	6
5.2.4. Incrustación.....	7
5.2.5. Sistema carbonato	7
5.2.6. Alcalinidad.....	8
5.2.7. Alteración del pH durante el proceso de potabilización	9
5.2.8. Índice de saturación de Langelier (ISL)	10
5.2.9 Potencial de precipitación de carbonato de calcio	10
5.2.10 Modelo matemático	11
6. METODOLOGÍA	11
6.1 Revisión bibliográfica.....	11
6.2 Revisión de datos experimentales	12
6.3 Selección de parámetros a estudiar.....	12
6.4 Recolección de datos	13
6.5 Estudio y aplicación del modelo.....	13
6.6 Propuesta de aplicación de la herramienta para las plantas.	14
7. RESULTADOS Y ANALISIS	15
7.1. Datos del agua clorada.....	15
7.2. Comparación de datos esperados contra datos experimentales PTAP Puerto Mallarino.....	16
7.3. Comparación de datos esperados contra datos experimentales PTAP Rio Cauca ...	27
8. CONCLUSIONES	41
9. RECOMENDACIONES	42
10. BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS.....	45
ANEXO 1. Lechada de cal.....	45

ANEXO 2. Manual	47
ANEXO.2.1. Preparación del PC.....	47
ANEXO.2.2. Herramienta de cálculo	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 6.1. Parámetros seleccionados para el análisis de la estabilidad química del agua ..	12
Tabla 6.2. Parámetros de comparación.....	13
Tabla 7.1. Datos del agua clorada de la PTAP Puerto Mallarino introducidos en el modelo	15
Tabla 7.2. Datos del agua clorada de la PTAP Río Cauca introducidos en el modelo	15
Tabla 7.3. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 2,5% de estabilizante	16
Tabla 7.4. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 3,5% de estabilizante	17
Tabla 7.5. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 4,5% de estabilizante	18
Tabla 7.6. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 2,5% de estabilizante	21
Tabla 7.7. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 3,5% de estabilizante	21
Tabla 7.8. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 4,5% de estabilizante	22
Tabla 7.9. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 2,5% de estabilizante	24
Tabla 7.10. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 3,5% de estabilizante	25
Tabla 7.11. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 4,5% de estabilizante	25
Tabla 7.12. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Río Cauca, dilución de 1,5% de estabilizante.....	27
Tabla 7.13. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Río Cauca, dilución de 2,5% de estabilizante.....	28
Tabla 7.14. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Río Cauca, dilución de 3,5% de estabilizante.....	29
Tabla 7.15. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Río Cauca, dilución de 1,5% de estabilizante.....	31
Tabla 7.16. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Río Cauca, dilución de 2,5% de estabilizante.....	31
Tabla 7.17. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Río Cauca, dilución de 3,5% de estabilizante.....	32
Tabla 7.18. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Río Cauca, dilución de 1,5% de estabilizante.....	34
Tabla 7.19. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Río Cauca, dilución de 2,5% de estabilizante.....	35
Tabla 7.20. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Río Cauca, dilución de 3,5% de estabilizante.....	36

Tabla 7.21. Resumen de dosis de Cal Apagada (mg/L) requeridas para llevar el índice de saturación de Langelier a cero en el proceso de estabilización química de las plantas de Potabilización de Puerto Mallarino y Rio Cauca de acuerdo con datos experimentales (Rodríguez, 2018) y los resultados de modelación con PRHEEQC.....	38
Tabla 7.22. Resumen de Valores de pH en el agua tratada requeridos para llevar el índice de saturación de Langelier a valor cero en el proceso de estabilización química de las plantas de Potabilización de Puerto Mallarino y Rio Cauca de acuerdo con datos experimentales (Rodríguez, 2018) y los resultados de modelación con PHREEQC.....	39
Anexo 3 tabla 1. Frecuencia de valores de pH medidos en el agua tratada de la PTAP Puerto Mallarino durante el año 2016	51
Anexo 3 tabla 2. Frecuencia de valores de pH medidos en el agua cruda de la PTAP Puerto Mallarino durante el año 2016.....	51
Anexo 3 tabla 3. Frecuencia de valores de pH medidos en el agua tratada de la PTAP Rio Cauca durante el año 2016.....	52
Anexo 3 tabla 4. Frecuencia de valores de pH medidos en el agua cruda de la PTAP Rio Cauca durante el año 2016.....	52

INDICE DE FIGURAS

Figura 5.2 Diagrama de distribución de las especies Carbonatadas.	8
Figura 7.1. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 1 en la PTAP Puerto Mallarino.....	19
Figura 7.2. ISL en función del pH para el día 1 en la PTAP Puerto Mallarino	20
Figura 7.3. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 2 en la PTAP Puerto Mallarino.....	23
Figura 7.4. ISL en función del pH para el día 2 en la PTAP Puerto Mallarino	23
Figura 7.5. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 3 en la PTAP Puerto Mallarino.....	26
Figura 7.6. ISL en función del pH para el día 3 en la PTAP Puerto Mallarino	27
Figura 7.7. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 1 en la PTAP Río Cauca	30
Figura 7.8. ISL en función del pH para el día 1 en la PTAP Río Cauca.....	30
Figura 7.9. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 2 en la PTAP Río Cauca	33
Figura 7.10. ISL en función del pH para el día 2 en la PTAP Río Cauca.....	34
Figura 7.11. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 3 en la PTAP Río Cauca	37
Figura 7.12. ISL en función del pH para el día 3 en la PTAP Río Cauca.....	37
ANEXO 1 figura 1. Lechada de cal a diferentes concentraciones	46
ANEXO 2 figura 1. Módulos comunes de PHREEQC.....	47
ANEXO 2 figura 2. Herramienta desarrollada para el cálculo de la dosis optima de estabilizante.....	48
ANEXO 2 figura 3. Datos de entrada del agua clorada	48
ANEXO 2 figura 4. Botón para correr la herramienta.....	48
ANEXO 2 figura 5. Datos de salida para el agua clorada	49
ANEXO 2 figura 6. Prueba de jarras con PHREEQXcel	49
ANEXO 2 figura 7. Cálculo de la dosis optima	50

RESUMEN

Los indicadores de agresividad del agua permiten conocer su carácter agresivo, y además el uso de índices, como el de Langelier, permiten llevar un correcto control del proceso de estabilización en la potabilización del agua, así como la realización de los cálculos necesarios para la adición de las sustancias químicas estabilizantes. La afectación en la calidad del agua hace necesario un proceso de estabilización al final del proceso de tratamiento, en el cual se asegura un agua con características ácidas o incrustantes que podrían generar afecciones en las tuberías. En cuanto al contexto local, las plantas de tratamiento de agua potable del río Cauca en Cali-Colombia, presenta aguas tratadas clasificadas como insaturadas con tendencia a la corrosión en el sistema de distribución, utilizando como alcalinizante cal hidratada, esto aun cumpliendo los rangos de pH y alcalinidad total dispuestos por la Resolución Colombiana 2115 de 2007.

Para la realización del presente trabajo, fue indispensable el análisis y organización de los datos experimentales del agua clorada lista para estabilizar en las plantas de potabilización de Puerto Mallarino y Río Cauca, donde se añadió un volumen creciente de solución estabilizante a lo largo de seis jarras y una vez realizada la mezcla de esta, se midieron los parámetros de temperatura, pH, alcalinidad, dureza total, dureza cálcica, conductividad y sólidos totales disueltos; y se realizó el cálculo del calcio total, dureza magnésica y el índice de saturación de Langelier. Por medio del análisis de estos parámetros mediante el modelo hidrogeoquímico PHREEQC se determinó la precisión de los datos arrojados por el modelo, que además de arrojar datos fiables, permitió comprobar la calidad de los datos medidos de manera experimental encontrando algunas incongruencias, como que la concentración del calcio en el agua no aumentaba a medida que se aumentaba la dosis de estabilizante.

Palabras clave: PHREEQC; pH; Potabilización; Planta de tratamiento; Modelo matemático; Estabilización; Incrustación; Corrosión; Índice de saturación; Langelier.

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de agua es una necesidad natural de los seres vivos del planeta. Es allí donde radica la importancia de proceso de potabilización de agua para el consumo humano. Debido al continuo deterioro de las fuentes hídricas por actividades antropogénicas las plantas de potabilización deben hacer uso de diversos recursos como tecnologías, procesos, estudios y sustancias, con el fin de garantizar una calidad fisicoquímica y microbiológica aptas en el agua para consumo humano de acuerdo con estándares establecidos por cada país.

Durante el proceso de potabilización se presentan diversos problemas que deben ser manejados con el fin de lograr la producción de un agua con las mejores características posibles. Algunas destacables y de interés son la corrosión e incrustación, que se dan en las unidades de tratamiento y en la red de tuberías del sistema de distribución de agua. Estas condiciones pueden evitarse en el mismo momento en el que el agua se entrega a la red, dado que generan altos costos de operación, mantenimiento y problemas que podrían dar a lugar a la suspensión del suministro de agua por la necesidad de hacer reparaciones en la red.

Es entonces cuando entra en juego el papel de la estabilización dentro de la potabilización de agua, realizando un balance químico del agua al final del proceso se puede asegurar su estabilidad química dentro del sistema de distribución de agua (Trejo Vázquez et al., 2007). El ajuste químico del pH, mediante sustancias químicas estabilizadoras, permite reducir la capacidad corrosiva o incrustante que tenga el agua, además de ser una solución común y de bajo costo si se compara con los costos asociados a la reparación de los daños en la red por un agua no estabilizada (Casey, 2009).

Por su parte los indicadores de agresividad del agua permiten conocer su carácter corrosivo, y además el uso de índices, como el de Langelier y potencial de precipitación de carbonato de calcio, permiten llevar un correcto control del proceso de estabilización en la potabilización del agua, así como la realización de los cálculos necesarios para la adición de las sustancias químicas estabilizantes. No obstante, dichos cálculos pueden ser dispendiosos a la hora de ser realizados en campo por los operadores de las plantas.

Es por lo anterior que el presente proyecto tuvo como fin realizar la evaluación de una alternativa para la realización de dichos cálculos de manera práctica y de uso simple. Para esto se buscó hacer uso de las nuevas tecnologías, utilizado software especializado para labores específicas, donde por medio de modelos matemáticos, hidro geoquímicos, como PHREEQC, interfases visuales y bases de datos, procurando facilitar y optimizar el proceso de estabilización en las plantas de tratamiento de agua potable de Puerto Mallarino y Río Cauca, en Cali – Colombia, así como la posibilidad de realizar cálculos extensos y comprobar la veracidad de las pruebas de laboratorio de manera dinámica y rápida.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los procesos de tratamiento de agua potable, como lo son la coagulación y la desinfección, es muy común el empleo de sustancias químicas, que alteran las características fisicoquímicas del agua. En primera instancia, los coagulantes en contacto con el agua reducen su alcalinidad total, lo que conlleva una disminución en los valores de pH. Una consecuencia similar es ocasionada en el proceso de desinfección debido a la adición de cloro, reduciendo el pH por acción de la formación de HCl y ácido hipocloroso (Casey, 2009).

Esta afectación en la calidad del agua hace necesario que el proceso de estabilización sea llevado a cabo al final del proceso de tratamiento, en el cual se asegura un agua con bajas características ácidas, que podrían producir corrosión en las tuberías de distribución; o con alta alcalinidad que podría formar incrustaciones en las tuberías, ocasionando una gradual reducción de diámetro de estas. En ambos casos se presenta una fuerte afectación en la prestación del servicio de distribución de agua potable, debido a sobrecostos generados por el mantenimiento de las líneas de distribución (Casey, 2009). Como alternativas de solución existen métodos de control de la corrosión mediante revestimiento de tuberías y adición de inhibidores como ortofosfatos o polifosfatos, aunque la mayoría de estos métodos presentan unos elevados costos de operación (NESC, 1997).

Actualmente se utilizan diferentes tipos de índices para determinar la corrosividad o incrustación del agua a lo largo del proceso de potabilización, así como a la salida de la planta. Entre estos se encuentran el índice de saturación de Langelier, el índice de estabilidad de Ryznar, el índice de corrosión de Riddick, el índice de fuerza de conducción de Mc Cauley, entre otros (Shankar, 2014).

Los operadores de las plantas de potabilización, utilizan métodos simplificados para el cálculo de la química del agua (van der Helm *et al.*, 2015) o utilizan criterios empíricos para la operación de los procesos. Esto, aunado a los errores de las prácticas humanas, disminuye la confiabilidad en las dosis de las sustancias químicas que se aplican a lo largo de la potabilización. Los operadores de las plantas de potabilización, utilizan métodos simplificados para el cálculo de la química del agua (van der Helm *et al.*, 2015) o utilizan criterios empíricos para la operación de los procesos.

Los cálculos anteriormente mencionados, pueden ser realizados de manera más precisa por medio de software y modelos matemáticos, como lo es el caso del modelo PHREEQC, que es un programa para simulación de reacciones químicas y procesos de transporte en aguas naturales o contaminadas (Parkhurst *et al.*, 2013). Para la aplicación del modelo en el proceso de potabilización, la Universidad Tecnológica de Delft desarrolló una extensión de la base de datos química phreeqc.dat, llamada stimela.dat (de Moel *et al.*, 2013).

En el panorama internacional se ha demostrado la incorporación de cálculos mediante PHREEQC por medio de la interfaz gráfica de Excel para su uso en la operación diaria, como lo es en la planta de tratamiento de agua potable Loenderveen-Weesperkarspel en Holanda, mediante una simulación de la estabilidad química del agua es posible la validación de mediciones en laboratorio y de la correcta operación de sensores en línea (van der Helm *et al.*, 2015).

En cuanto al contexto local, la planta de tratamiento de agua potable de Puerto Mallarino en Cali-Colombia, presenta aguas tratadas clasificadas como insaturadas con tendencia a la corrosión en el sistema de distribución, utilizando como alcalinizante cal hidratada, esto aun cumpliendo los rangos de pH y alcalinidad total dispuestos por la Resolución Colombiana 2115 de 2007 (Bueno Zabala et al., 2014).

Es entonces, como surge la pregunta de la cual nace el presente proyecto de investigación: ¿Cómo evaluar la variación de la estabilidad química del agua mediante el modelo hidrogeoquímico PHREEQC, utilizando la base de datos stimela.dat, en el proceso de potabilización en la planta de potabilización de Puerto Mallarino y en la planta de Rio Cauca, en Cali – Colombia?

3. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, conocer la variación de la estabilidad química del agua requiere un riguroso seguimiento, así como el análisis continuo de pruebas acreditadas de laboratorio. Es importante también tener en cuenta de que los cálculos para el proceso de estabilización en la planta de tratamiento de agua potable Puerto Mallarino, son realizados bajo la premisa del producto aplicado posee una concentración del 100% de carbonato de calcio. Lo anterior hace sumamente imprecisas las dosis necesarias para garantizar una buena salud en la red de distribución, por lo que se entrega agua ligeramente corrosiva en la misma, o con un potencial de precipitación de carbonato de calcio muy bajo, eliminando la posibilidad de generar una capa protectora en las tuberías. Con el presente trabajo, se espera aportar un complemento práctico y preciso para el cálculo de la adición de estabilizante, así como una alternativa económica con potencial uso en las plantas de tratamiento en nuestra región.

Este trabajo pretende implementar una nueva metodología de cálculo recientemente desarrollada y aunque con mucho potencial, poco aplicada y conocida a nivel mundial. Se propone no solo optimizar el uso de materia prima durante el proceso de potabilización, que también reduce los costos de este; sino también de manera indirecta busca mejorar la calidad del agua potabilizada, mediante el cálculo de dosis más exactas de los reactivos necesarios para el proceso.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Evaluar la variación de la estabilidad química del agua, en el proceso de potabilización en las plantas de tratamiento del río del Cauca que abastecen el municipio de Santiago de Cali, Puerto Mallarino y Río Cauca, por medio de simulaciones en el modelo matemático PHREEQC.

4.2. Objetivos específicos

- Analizar la variación de la estabilidad química del agua, aplicando el modelo hidrogeoquímico PHREEQC, en el agua clorada y estabilizada de las plantas de potabilización de Puerto Mallarino y Río Cauca.
- Validar los datos de estabilidad química del agua obtenidos mediante el modelo hidrogeoquímico PHREEQC, comparando datos experimentales entre el agua clorada y estabilizada de las plantas de potabilización de Puerto Mallarino y Río Cauca.
- Proponer una interfaz en Excel, para facilitar el uso del modelo hidrogeoquímico en el proceso de estabilización en las plantas de potabilización de Puerto Mallarino y Río Cauca.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1. Marco contextual

El equilibrio químico del agua debe ser constantemente supervisado para ser entregada a la red de distribución. Un agua con un equilibrio químico inestable puede devenir en problemas de corrosión o incrustación en una red de distribución, lo que se traduce en pérdidas de agua, aumento en las pérdidas de carga y mala calidad en el agua suministrada a los consumidores. Maddison et al. (2001) realizaron una investigación donde se evaluaron diferentes estrategias para el control de la corrosión en el sistema de distribución regional de Halifax, Nueva Escocia (Canadá), donde se concluye el efectivo uso de la adición de químicos como polifosfatos y cal para aumentar la alcalinidad del agua, donde en el segundo caso se hizo notorio el precipitado generado por el exceso en el uso de esta.

De igual manera Bueno Zabala et al. (2014) realizó un trabajo de investigación con propósito de evaluar el proceso de estabilización en el agua tratada de la planta de potabilización de Puerto Mallarino (Colombia), lo anterior mediante índices de agresividad y saturación, entre ellos el índice de saturación de Langelier. Una de sus recomendaciones fue que, a la hora de realizar un análisis de la estabilidad química del agua y su influencia en la red de distribución, es importante tener en cuenta al menos un índice que proporcione información sobre la capacidad que tiene el carbonato de calcio en el agua tratada a precipitarse. A rasgos generales, esta investigación concluye que los índices de estabilización, bajo un adecuado uso, son un método indirecto acertado para valorar las características de la estabilidad química del agua.

Trujillo et al. (2008) analizó las condiciones de equilibrio químico del agua del principal tanque de distribución de la ciudad de Toluca (México). Para esto se hizo uso del modelo de Mojmir-Mach, así como de los índices de Langelier y Ryznar, esto a través del software AgrInc_Agua 2.0, donde se aplicaron datos fisicoquímicos obtenidos de muestreos realizados a lo largo de seis meses. Una vez identificados los problemas de corrosión que presentaban, se establecieron condiciones de equilibrio químico con base a hidróxido de calcio, carbonato de calcio y aireación; concluyendo que el control de estas variables permite proteger la infraestructura hidráulica del sistema de distribución de agua, ayuda a reducir la frecuencia de los mantenimientos y disminuye la necesidad de reemplazos que son producto de corrosión.

No obstante, el modelo de Mojmir-Mach y el software AgrInc_Agua 2.0 no son los únicos existentes para la modelación de procesos hidrogeoquímicos, PHREEQC es el modelo estándar a la hora de realizar este tipo de cálculos, gracias a que PHREEQC contiene todos los equilibrios y reacciones químicas necesarias (Parkhurst et al., 2013). Tesis recientes han mostrado que PHREEQC también es muy adecuado para la modelación de la estabilidad química del agua potable y para los procesos de potabilización del agua. Por esto, de Moel et al. (2012) desarrollaron un módulo educativo para la aplicación de PHREEQC en agua potable y aguas residuales.

Gracias a la práctica de los estudios anteriores Van der Helm et al. (2015) desarrollaron la base de datos stimela.dat, específica para los cálculos en PHREEQC de la química acuática en los procesos de tratamiento de agua potable. Realizando una interfaz gráfica en el software Excel, lograron incorporar complejos cálculos químicos con el fin de facilitar el uso de PHREEQC a los operarios de las plantas de tratamiento de agua potable. La aplicabilidad de lo anterior es demostrada mediante una simulación de la estabilidad química del agua en la

planta de tratamiento de agua potable Weesperkarspel, en Holanda, concluyendo que mediante este tipo de modelación es posible la validación de mediciones en laboratorio y de la correcta operación de sensores en línea.

5.2. Marco teórico

5.2.1. Potabilización del agua

La actividad antrópica genera una innegable afectación a las fuentes de agua naturales, actividades como la agricultura, ganadería y minería que terminan por aportar desechos y contaminantes a las aguas, lo que hace cada vez más difícil la labor de conseguir agua apta para el consumo humano. Se hace necesario entonces que el agua sea sometida a una serie de procesos u operaciones unitarias secuenciales, con el fin de remover los contaminantes microbiológicos presentes en la misma y algunos fisicoquímicos, purificándola de acuerdo con los límites estipulados por las normas de cada país. Esto con el fin de que el consumo de agua no cause afectaciones a la salud de las poblaciones (de Vargas, 2004). Una planta de potabilización convencional es una secuencia de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

5.2.2. Estabilización

Se conoce como estabilización al ajuste de pH y acondicionamiento químico que se le hace al agua al inicio del proceso de potabilización para garantizar las condiciones óptimas de operación de los coagulantes y desinfectantes químicos o al final de la secuencia de procesos para garantizar su estabilidad en la red de distribución. Al final de los procesos es necesario realizar esta operación, puesto que con ella se consigue reducir la capacidad corrosiva o incrustante con la que el agua pueda salir al final del proceso de potabilización. Lo anterior, consecuencia del uso de químicos que consumen la alcalinidad del agua y afectan las características fisicoquímicas de la misma (Casey, 2009).

La desestabilización en el pH es dada por la alteración del sistema carbonato, debido a la contaminación natural o antrópica de las aguas superficiales y los químicos utilizados durante la coagulación y la desinfección, afectando la concentración de dióxido de carbono libre y carbonato de calcio. Al final lo que se busca en la estabilización no es solo que el agua no tenga características corrosivas, sino que también sea capaz de formar una película protectora de carbonato de calcio en el interior de las tuberías, para lo que es necesario una reacción de neutralización (Schock, 2002; Casey, 2009).

5.2.3. Corrosión

La corrosión es definida como el ataque a la estructura de un material por una reacción química o electroquímica con su medio. Dicha corrosión es producida en el agua por el oxígeno disuelto, el dióxido de carbono o por ácidos, degradando la superficie del material y propagándose hacia el interior de este (Gómez de León Higes et al., 2004).

En los sistemas de distribución de agua, la corrosión se traduce en la pérdida del espesor de las tuberías, afecciones en la capacidad de carga hidráulica y disminución en la resistencia de estas a sobre presiones y rupturas, lo que podría permitir la entrada a organismos patógenos y sustancias dañinas para la salud. También puede causar desprendimiento del material que puede degenerar en bloqueos y acumulaciones en el sistema de distribución. Debido a los contaminantes que se pueden generar al reaccionar con el material de las tuberías, la corrosión también puede deteriorar la calidad del agua servida (Bueno Zabala et al., 2014).

Grandes daños en la red de distribución por culpa de la corrosión pueden conllevar a sobre costos en la operación y mantenimiento del sistema o llevar incluso a su inhabilitación, obligando a suspender la operación de manera parcial (Maddison et al., 2001). Por esto es importante prestar atención al pH del agua tratada, un agua con un pH bajo poseerá naturalmente propiedades corrosivas (Schock, 2002).

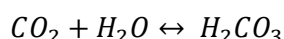
5.2.4. Incrustación

Se define a la incrustación como el depósito adherido que se solidifica sobre la superficie interna de los conductos de distribución. En las tuberías de agua potable se manifiesta en forma de calcificaciones principalmente compuestas por carbonato de calcio (CaCO_3). Las incrustaciones afectan la capacidad de transporte y conducción de las tuberías, ya que disminuye el diámetro interno de estas, perjudicando el rendimiento del sistema de distribución, aumentar los costos operación y mantenimiento (Trujillo et al., 2008; Casey, 2009), además de un gran impacto que esta presenta en la calidad del agua.

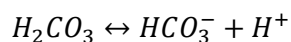
Es importante entonces conocer los factores físicos y químicos de los cuales depende la incrustación, tales como el pH, la alcalinidad, el tipo y cantidad de sustancias disueltas, la dureza, el tipo de régimen de flujo, etc. El pH, por ejemplo, es un parámetro importante por controlar, debido a que este afecta el estado de las diluciones, por lo que un pH alto es un fuerte indicador de la capacidad incrustante de un agua.

5.2.5. Sistema carbonato

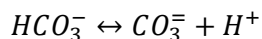
El sistema carbonato es el proceso natural que utilizan las aguas para su auto regulación y estabilización (Eyre et al., 2014). El proceso comienza cuando el dióxido de carbono CO_2 presente en la atmosfera, por medio de dilución, pasa a reaccionar con el agua para formar ácido carbónico, H_2CO_3 . En condiciones de exceso de dióxido de carbono, este termina por reaccionar con el carbonato de calcio CaCO_3 , lo que causa un aumento en la concentración del ion de bicarbonato, HCO_3^- , provocando un aumento en el pH del agua. En contraposición, cuando existe un déficit de dióxido de carbono, el carbonato de calcio tiende a precipitarse, disminuyendo su concentración, lo que causa un aumento en la concentración de dióxido de carbono, acidificando el agua (Baird et al., 2014). Este proceso se ilustra mediante las ecuaciones 1, 2, 3 y 4.



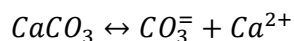
Ecuación 1. Formación del ácido carbónico



Ecuación 2. Formación del ion bicarbonato



Ecuación 3. Formación del ion carbonato



Ecuación 4. Disociación del carbonato de calcio

5.2.6. Alcalinidad

Es la capacidad que tiene el agua para neutralizar ácidos o aceptar protones, y se debe a la presencia de iones como carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos provenientes de la disociación de sales de ácidos débiles y bases fuertes. También contribuyen a ella los fosfatos, sistema carbonato y silicatos. En el tratamiento de agua para consumo humano es de gran importancia debido a que esta determina la dosis de sustancias químicas necesarias para su tratamiento. El agua considerada básica es aquella con altos niveles de pH y sólidos disueltos, esta agua puede tener consecuencias negativas en los sistemas de tratamiento de agua y de distribución (Sousa et al., 2010)

La alcalinidad total esta descrita principalmente por la siguiente ecuación 5:

$$\text{Alcalinidad} = 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{OH}^-]$$

Ecuación 5. Alcalinidad total

La distribución del sistema carbonato como se muestra en la figura 5.2, se observa la concentración de las especies carbonatadas en función del pH, a valores de pH inferiores a 7 unidades, la alcalinidad total se ve afectada presentando una disminución significativa (Barcelo et al., 2002).

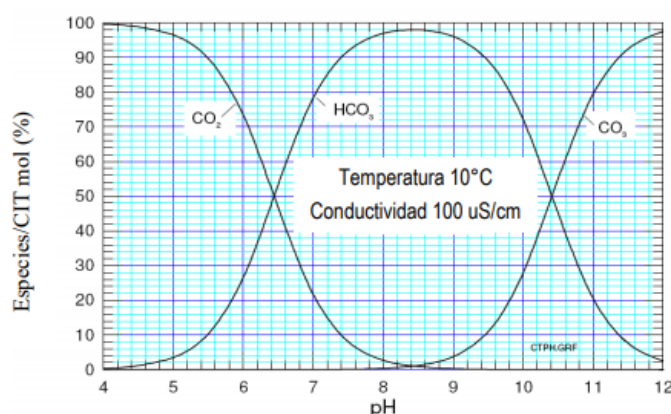
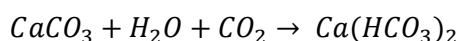


Figura 5.2 Diagrama de distribución de las especies Carbonatadas.

Fuente: (Casey, 2009)

5.2.7.1. Conversión del bicarbonato

Se considera necesaria la conversión de la alcalinidad con concentración en equivalentes de CaCO_3/L a equivalentes HCO_3^-/L por razones prácticas del modelo, por lo que se realizó teniendo en cuenta la siguiente reacción:



Ecuación 6.

Teniendo en cuenta que el CaCO_3 presenta un peso molecular de 100 g/mol y el anión HCO_3^- un peso molecular de 61 g/mol; por lo tanto, cada mol de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ corresponde a un mol de CaCO_3 (100 g) y contiene 122 g de HCO_3^- , entonces la conversión es la siguiente:

$$\text{Alcalinidad bicarbonatica como } \text{HCO}_3^- \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 1,22 \times \text{Alcalinidad bicarbonatica como } \text{CaCO}_3 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)$$

Ecuación 7. Conversión de alcalinidad

5.2.7. Alteración del pH durante el proceso de potabilización

El pH del agua se ve afectado durante su potabilización principalmente debido a dos procesos, la coagulación y la desinfección, puesto que es en estos procesos donde existe una adición de químicos como coagulantes y desinfectantes al agua que se está tratando. El pH también suele ser un parámetro de control para algunos procesos, por lo que es importante llevar un control sobre este.

5.2.7.1 Coagulación

Durante el proceso de potabilización es importante la reducción de la materia orgánica que se encuentra en el agua, normalmente en forma de partículas coloidales. Para esto, las plantas de tratamiento de agua potable utilizan agentes coagulantes con el fin de agrupar las partículas que no pueden ser removidas por medios físicos, en grandes flóculos que hagan posible su extracción. Dichas partículas, como los coloides, deben ser desestabilizadas para ser posible su aglomeración, lo que es posible gracias a la adición de un reactivo coagulante, que aporta carga positiva al agua. (Henry et al., 1999; Trejo Vázquez et al., 2007) Estas cargas positivas neutralizan las cargas negativas de los coloides presentes en el agua permitiendo el acercamiento de las partículas, pero esta reacción libera iones hidronio H^+ , que reduce el pH. Estos iones tienden a ser neutralizados por lo que se reduce la alcalinidad del agua y en algunas ocasiones es necesario la adición de un alcalinizante o sustancia básica (Levine, 2004; Matilainen et al., 2010).

5.2.7.2 Desinfección

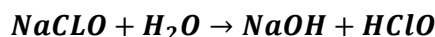
La desinfección es un proceso imprescindible dentro de la potabilización de agua, puesto que es aquí donde se higieniza y se eliminan los patógenos que puedan causar afección a la salud humana, esto se hace mediante la destrucción selectiva de dichos organismos, hasta alcanzar una concentración inocua (Trejo Vázquez et al., 2007; Colindres Mejía, 2010). Para la desinfección se utiliza la adición de unas sustancias químicas como el cloro gaseoso y los hipocloritos de sodio o de calcio; que destruyen a los patógenos presentes en el agua que pueden terminar por transmitir enfermedades. No obstante, este agente químico se hidroliza casi por completo en el agua y posteriormente se disocia en iones hidronio, lo que causa una disminución del pH, como se muestra en la ecuación 8, 9, 10 y 11 (Trejo Vázquez et al., 2007; Sousa et al., 2010).



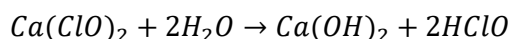
Ecuación 8. Hidrolisis del cloro



Ecuación 9. Ionización



Ecuación 10. Disociación del hipoclorito de sodio



Ecuación 11. Disociación del hipoclorito de calcio

5.2.8. Índice de saturación de Langelier (ISL)

Para poder establecer los programas de estabilización para la corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución, es importante caracterizar cualitativa y cuantitativamente el agua; para lo cual se considera el uso de índices los cuales pueden ser de tipo cualitativo o cuantitativo, algunos se fundamentan en la existencia de una fina capa de CaCO_3 en el interior de las tuberías del sistema de distribución, evaluando el equilibrio del CaCO_3 en el agua e indicando su posible tendencia o característica en el SDA y otros evalúan el comportamiento del agua dependiendo del tipo de tubería (Trujillo et al., 2008).

El índice de saturación de Langelier siendo de tipo cualitativo es el mayormente empleado debido a su fácil aplicación (Trujillo et al., 2008). Define la agresividad del agua con respecto al carbonato de calcio CaCO_3 , y se basa en el efecto del pH sobre el equilibrio de solubilidad de CaCO_3 (Sousa et al., 2010).

$$I_L = pH - pH_s$$

Ecuación 12. Cálculo del índice de saturación de Langelier

Donde:

I_L : Índice de saturación de Langelier

pH: Potencial de Hidrogeno

pH_s : Potencial de Hidrogeno en condiciones de saturación.

Si $IL > 0$, el agua está sobresaturada, el CaCO_3 se deposita, por lo tanto, el agua es incrustante.

Si $IL = 0$, el agua está saturada (en equilibrio) con CaCO_3 , éste ni se precipita ni se disuelve.

Si $IL < 0$, el agua está insaturada, el CaCO_3 tiende a disolverse por lo tanto el agua es agresiva

5.2.9 Potencial de precipitación de carbonato de calcio

Indica la masa teórica aproximada del CaCO_3 que podría precipitar sobre la superficie de una tubería. Durante la precipitación del CaCO_3 , los equivalentes de calcio precipitado deben ser iguales a los equivalentes de la alcalinidad precipitada, por otro lado presenta limitaciones en la determinación de las dosis químicas que se aplican para obtener un agua con una PPCC determinado (Loewenthal et al., 2004).

$$PPCC = Alc_i - Alc_{eq}$$

Ecuación 13. Cálculo del potencial de precipitación de carbonato de calcio

Donde:

PPCC: Potencial de precipitación del carbonato de calcio.

Alc_i : Alcalinidad inicial

Alc_{eq} : Alcalinidad en equilibrio

PPCC > 0, denota sobresaturación y los mgCaCO₃/L que deben precipitar.

PPCC < 0, indica insaturación y cuanto CaCO₃ debe disolverse.

5.2.10 Modelo matemático

Un modelo matemático es una representación matemática de fenómenos naturales a través de sistemas con características comunes y previamente definidas, en este se definen diversas variables de entrada como el conjunto de datos ingresados inicialmente, las cuales serán procesadas y transformadas por el modelo presentando resultados comprensivos para interpretar, comparar y graficar datos obtenidos permitiendo su análisis (Lecomte, 2003).

PHREEQC es un programa de computadora de uso libre desarrollado por el Servicio geológico de Estados Unidos, se creó originalmente como un programa para modelar la química acuática en aguas subterráneas por lotes y sus interacciones con diferentes materiales sólidos y fases gaseosas. Este modelo ha estado en funcionamiento por más de tres décadas con diversas actualizaciones y en los últimos años se desarrolló la interfaz gráfica de usuario. La aplicabilidad de PHREEQC es ampliamente conocida en el campo de la geohidrología y su aplicación en tratamiento de agua es casi desconocida, no obstante, en los últimos años ha sido adaptado y desarrollado en dicho campo (van der Helm *et al.*, 2015).

La característica más atractiva del modelo matemático PHREEQC es que permite el uso de bases de datos adaptados, haciendo posible su aplicabilidad en el campo específico del tratamiento de aguas mediante la base de datos stimela.dat, desarrollada por de Moel *et al.* (2015). Dicha base de datos es necesaria puesto que a diferencia de la geoquímica, en el tratamiento de aguas algunos parámetros no pueden ser asumidos, como el equilibrio termodinámico de todas las reacciones redox (van der Helm *et al.*, 2015).

Tener una base científica comprobable y sustentada, su facilidad para adaptarse a nuevo conocimiento científico, permitir que los usuarios puedan modificar y ampliar los códigos simbólicos de entrada de propósito general para principiantes (BASIC) y estar disponible de manera gratuita -en conjunto con la base de datos stimela.dat, que añade estados de oxidación del nitrógeno y especies típicas del agua subterránea- hacen de PHREEQC un modelo matemático atractivo para su implementación en el campo del tratamiento de aguas (van der Helm *et al.*, 2015).

6. METODOLOGÍA

6.1 Revisión bibliográfica

Durante todo el desarrollo del trabajo se realizó una revisión bibliográfica enfocada al proceso de estabilización en la potabilización de agua y el uso de modelos matemáticos y su aplicación para el tratamiento de agua potable, esto último principalmente enfocado en el modelo matemático PHREEQC y la base de datos stimela.dat desarrollada por la universidad de Delft - Holanda.

6.2 Revisión de datos experimentales

Para la realización del presente trabajo, fue indispensable el análisis y organización de los datos experimentales obtenidos por Rodríguez (2018), quien para su tesis titulada INFLUENCIA DE DOS COAGULANTES EN EL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN QUÍMICA EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA DEL RÍO CAUCA analizó datos de parámetros físicoquímicos durante tres días del agua clorada lista para estabilizar en las plantas de potabilización de Puerto Mallarino y Río Cauca.

En el año 2018, Rodríguez realizó muestreos durante tres días en el agua clorada previa a la estabilización en las plantas de Puerto Mallarino y Río Cauca. A dichas muestras se les realizó la medición de los parámetros de temperatura, pH, alcalinidad, calcio magnesio y cloruros. Posteriormente, se procedió a realizar pruebas de jarras para tres concentraciones distintas de estabilizante Ca(OH)_2 , 2,5%, 3,5% y 4,5% para el caso de Puerto Mallarino y 1,5%, 2,5% y 3,5% para el caso de Río Cauca. Para cada una de las concentraciones se añadió un volumen creciente de solución estabilizante a lo largo de seis jarras y una vez realizada la mezcla de esta, se midieron los parámetros de temperatura, pH, alcalinidad, dureza total, dureza cálcica, conductividad y sólidos totales disueltos; y se realizó el cálculo del calcio total, dureza magnésica y el índice de saturación de Langelier.

Los datos anteriormente mencionados, fueron tratados, ordenados y seleccionados, de acuerdo con los necesarios para la aplicación del modelo hidrogeoquímico PHREEQC. Este acondicionamiento y tratamiento fue necesario tanto para los datos del agua cruda, como para los parámetros medidos en las pruebas de jarras realizadas.

Para finalizar el tratamiento de los datos, estos se separaron por cada uno de los días y planta en que fueron tomados, así como por la concentración de estabilizante que fue agregado a cada una de las jarras. En esta instancia, también fueron seleccionados los datos que servirían como punto de comparación para los datos arrojados por el modelo hidrogeoquímico PHREEQC.

6.3 Selección de parámetros a estudiar

Los parámetros analizados de manera experimental que se utilizaron para la determinación de la estabilidad química del agua en las plantas de potabilización de Puerto Mallarino y Río Cauca mediante el modelo hidrogeoquímico PHREEQC, son los descritos a continuación en la tabla 6.1. Estos datos corresponden a los parámetros medidos en el agua clorada previa a la estabilización en cada una de las plantas.

Tabla 6.1. Parámetros seleccionados para el análisis de la estabilidad química del agua

Parámetro	Unidades	Método de análisis
Cationes		
Calcio	mg/L de Ca	Titulométrico (EDTA)
Magnesio	mg/L de Mg	Calculado
Aniones		
Cloruros	mg/L de Cl	Argentométrico
Otros		
Temperatura	°C	Medición directa (Termómetro)
pH	Unidades	Potenciométrico (pHmetro)
Alcalinidad	gCaCO ₃ /L	Titulométrico (Ácido sulfúrico)

Para el caso de los parámetros de control, se seleccionaron los datos de los parámetros fisicoquímicos medidos en las pruebas de jarras, para las diferentes concentraciones de estabilizante durante cada uno de los días y para el agua de cada una de las plantas. Estos parámetros se seleccionaron a modo de datos de calibración para realizar su respectiva comparación con los datos arrojados por el modelo hidrogequímico PHREEQC y son presentados en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. *Parámetros de comparación*

Parámetro	Unidades	Método de análisis
pH	Unidades	Potenciométrico (pHmetro)
Alcalinidad		Titulométrico (Ácido sulfúrico)
Calcio	mg/L Ca	Titulométrico (EDTA)
Índice de saturación de Langelier	N.A.	Calculado

6.4 Recolección de datos

Los datos recopilados y analizados provienen del estudio realizado a mediados del año 2017 en titulada INFLUENCIA DE DOS COAGULANTES EN EL PROCESO DE ESTABILIZACION QUIMICA EN LA POTABILIZACION DEL AGUA DEL RIO CAUCA (Rodríguez, 2018), donde se recopiló datos de parámetros fisicoquímicos mencionados en la Tabla 6.2 durante tres días del agua clorada lista para estabilizar en las plantas de potabilización de Puerto Mallarino y Río Cauca, con el fin de analizar los parámetros del agua sin dosis de cal en ambas plantas.

La planta Puerto Mallarino, prepara una solución de cal apagada, alrededor de 3.5% (peso/Volumen); mientras que la planta Río Cauca prepara una solución alrededor de 2.5% (peso/Volumen). De acuerdo con la literatura y los valores de lechada preparada en las dos plantas, se seleccionaron para la investigación, las concentraciones de lechada a preparar de 1,5; 2,5 y 3,5% (peso/volumen) para la planta Río Cauca, y 2,5; 3,5 y 4.5% (peso/volumen) para la planta Puerto Mallarino. La preparación de lechada de cal apagada, se puede observar con mayor detalle en el anexo 1.

Las dosis utilizadas por Rodríguez (2018) fueron seleccionadas mediante la información histórica de las plantas, como lo son el pH y los índices de estabilización obtenidos en el agua tratada, llevando a la selección de dosis que variaban entre 1,48 mg/L y 20,68 mg/L de cal apagada para la planta Río Cauca y de entre 2,46 mg/L y 26,29 mg/L de cal apagada para la planta de puerto Mallarino.

6.5 Estudio y aplicación del modelo

El modelo matemático utilizado durante la fase experimental del presente proyecto corresponde al modelo hidrogeoquímico PHREEQC operando con la base de datos stimela.dat, desarrollada por AC4E y adaptada a la interfaz gráfica de Excel. Los códigos para el funcionamiento del modelo fueron programados directamente en la interfaz gráfica de PHREEQXEL, adaptando y escribiendo nuevas líneas de código sobre las aplicaciones para tratamiento de aguas de AC4E. Los datos del agua proveniente del proceso de cloración fueron utilizados como datos de entrada al modelo hidrogeoquímico PHREEQC y los datos tomados de las pruebas de jarras fueron utilizados como datos de calibración y comparación, con respecto de los datos arrojados directamente por el modelo.

Una vez se obtuvieron los datos arrojados por el modelo se procedió a realizar la respectiva comparación contrastando con los datos obtenidos de manera experimental, estos datos fueron tabulados junto con el respectivo error calculado entre la diferencia del valor arrojado por el modelo, que se tomó como el valor real esperado, y el valor medido de manera experimental para cada uno de los días y las concentraciones anteriormente descritas. Para finalizar se realizaron graficas comparativas con el total de los datos de cada día, con el fin de analizar el comportamiento de la curva de estabilización esperada para la calidad de agua de cada día específico; y la generada a partir de los datos obtenidos de manera experimental.

6.6 Propuesta de aplicación de la herramienta para las plantas.

Finalmente se desarrolló la propuesta de una interfaz gráfica en una hoja de cálculo de Excel ligada al modelo hidrogeoquímico PHREEQC y la base de datos STIMELA, esto con el fin de facilitar los cálculos y operaciones complejas a los operadores de la planta, suministrando una herramienta para el cálculo la dosis optima de estabilizante, siendo este el producto final del presente trabajo de grado.

7. RESULTADOS Y ANALISIS

7.1. Datos del agua clorada

Para la puesta en marcha del modelo se introdujeron los datos de calidad del agua clorada de las plantas de tratamiento de agua potable de Puerto Mallarino y Río Cauca presentados en las tablas 7.1 y 7.2. Estos constituyen el agua base sobre la cual el modelo calculó el comportamiento de las mezclas del agua y la solución de estabilizante bajo las diferentes concentraciones de estabilizante aplicado.

Tabla 7.1. Datos del agua clorada de la PTAP Puerto Mallarino introducidos en el modelo

PTAP Puerto Mallarino		Día 1	Día 2	Día 3
PARAMETROS	UNIDADES	VALOR	VALOR	VALOR
T	°C	23,5	23,7	23,1
pH	und pH	5,8	6,17	6,3
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	1,9	6,1	7,6
Cloruros	mg Cl/L	9,22	7,09	10,63
Calcio	mg Ca/L	4,32	4,32	7,2
Magnesio	mg Mg/L	2,19	4,37	3,6

Para el caso del agua clorada de la PTAP Puerto Mallarino se observa que en este proceso el agua presento variaciones menores a 1 °C en los tres días en los cuales se realizaron las pruebas, oscilando en valores de alrededor de 23,5 °C. Para el caso del pH sucede una situación similar, donde este oscila en valores alrededor de las 6 unidades. La cantidad de cloruros varia significativamente entre días y esto puede deberse a la dosis utilizada de cloro gaseoso. Los valores de calcio y magnesio, donde se esperaría que el primero fuese mayor del segundo, no obstante, este comportamiento solo se observa en el primer y último día, para el segundo día el valor de ambas concentraciones es muy similar. Cabe resaltar que los valores de las concentraciones de calcio y magnesio presentan diferencias drásticas entre días.

Tabla 7.2. Datos del agua clorada de la PTAP Río Cauca introducidos en el modelo

PTAP Río Cauca		Día 1	Día 2	Día 3
PARAMETROS	UNIDADES	VALOR	VALOR	VALOR
T	°C	22,4	23,1	22,8
pH	und pH	6,94	6,94	7,03
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	15,2	20	21
Cloruros	mg Cl/L	6,38	9,22	8,51
Calcio	mg Ca/L	5,76	5,04	7,92
Magnesio	mg Mg/L	3,50	2,19	1,31

En el caso de la PTAP Río Cauca la temperatura varía alrededor de los 22,8 °C y los valores de pH se notan más estables, alrededor de las 7 unidades por día, esto puede ser atribuido al coagulante hidroxiclورو de aluminio (ACH) utilizado en la planta, que posee como una de sus características la baja afectación al pH del agua. En el caso de esta PTAP los valores de calcio y magnesio si tienden a seguir el comportamiento esperado.

El valor de pH del agua cruda de ambas plantas de potabilización, según los registros de operación de Emcali del año 2016, evidencia que durante alrededor del 95% del tiempo oscila entre los valores de 6,9 y 7,2 unidades. Luego de la aplicación del coagulante en ambas plantas de potabilización, en el agua que llega al proceso de estabilización, se observa que en la planta de Puerto Mallarino el valor de pH se encuentra casi una unidad por debajo del que se registra en la planta de potabilización Río Cauca. (Ver Anexo 3.)

7.2. Comparación de datos modelados contra datos experimentales PTAP Puerto Mallarino

Para realizar la comparación, se contrastaron los datos medidos en las pruebas de jarras realizadas en el estudio INFLUENCIA DE DOS COAGULANTES EN EL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN QUÍMICA EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA DEL RÍO CAUCA llevado a cabo por Rodríguez (2018), que fueron utilizados para realizar el cálculo del índice de Langelier, contra los datos generados por el modelo. Cabe resaltar que para este momento en la PTAP Puerto Mallarino se estaba utilizando cloruro férrico en el proceso de coagulación. En las tablas 7.3, 7.4 y 7.5 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de jarras y los arrojados por el modelo, para el agua del primer día donde se llevaron a cabo las pruebas experimentales en la PTAP Puerto Mallarino para los parámetros seleccionados, Alcalinidad, pH, Calcio e índice de saturación, así como el respectivo error que se presentó entre los valores de los resultados.

Tabla 7.3. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 2,5% de estabilizante

Día 1 – Dilución de lechada 2,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	1,25 mg/L	2,5 mg/L	3,75 mg/L	5 mg/L	6,25 mg/L	7,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	3,591	5,278	6,965	8,652	10,339	12,026
Experimental	3,2	5,7	6,1	8,5	11,2	13,9
Error	-11%	8%	-12%	-2%	8%	16%
Parámetro	pH					
Phreeqc	6,18	6,50	6,88	7,69	9,13	9,50
Experimental	6,52	7,33	7,8	8,74	9,19	9,43
Error	6%	13%	13%	14%	1%	-1%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	4,998	5,672	6,347	7,022	7,697	8,372
Experimental	5,04	5,04	6,48	6,48	7,2	7,92
Error	1%	-11%	2%	-8%	-6%	-5%

Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-3,798	-3,256	-2,711	-1,773	-0,319	0,033
Experimental	-3,352	-2,293	-1,685	-0,603	0,011	0,384

Para el caso de la dilución de 2,5% de Ca(OH)_2 durante el primer día de muestreo experimental, se observa que los errores son más altos del valor tolerable (5%), en la mayoría de los parámetros de comparación. Es importante resaltar que, en dosis pequeñas el error experimental se hace más evidente, como es el caso de las jarras 1 y 2 que presentan la misma concentración de calcio aun cuando a la segunda jarra se le adicionó una concentración del doble de la primera jarra, por lo que este valor debería incrementar y no mantenerse estable, comportamiento que si es descrito en los valores de calcio calculado por el modelo para cada una de las jarras. Este mismo suceso se repite entre las jarras 3 y 4. Este comportamiento en los valores experimentales puede deberse al método de titulación utilizado para realizar dichas mediciones, puesto que este se encuentra sujeto a la experticia de la persona que lo realiza, así como a las condiciones de los materiales y el control de calidad analítico donde se realizan los análisis.

Los valores de pH no deberían variar mucho entre ellos y esto se respeta en dosis altas de estabilizante, no obstante, se observa como el error va disminuyendo a medida que se aumentan las dosis de estabilizante, por lo que esta diferencia entre los valores de pH medidos y calculados puede atribuirse a una incorrecta dosificación de estabilizante en las dosis pequeñas de las pruebas de jarras. Este argumento toma más peso si se analizan los índices de Langelier medidos y calculados, donde en todos los casos el agua de las jarras presenta una característica más incrustante según el valor calculado por el modelo, significando esto una mayor concentración de CaCO_3 y por lo tanto una mayor dosificación de la registrada en laboratorio.

Tabla 7.4. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 3,5% de estabilizante

Día 1 - Dilución de lechada 3,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	1,75 mg/L	3,5 mg/L	5,25 mg/L	7 mg/L	8,75 mg/L	10,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	4,266	6,628	8,990	11,352	13,713	16,075
Experimental	4,7	6,8	9,4	11,100	14,4	16,9
Error	10%	3%	5%	-2%	5%	5%
Parámetro	pH					
Phreeqc	6,31	6,79	8,13	9,38	9,71	9,91
Experimental	6,70	7,00	8,03	8,45	9,19	9,60
Error	6%	3%	-1%	-10%	-5%	-3%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	5,268	6,212	7,157	8,102	9,046	9,991
Experimental	3,6	3,6	4,32	5,04	5,04	5,04
Error	-32%	-42%	-40%	-38%	-44%	-50%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					

Phreeqc	-3,573	-2,828	-1,312	-0,076	0,225	0,397
Experimental	-3,152	-2,693	-1,445	-0,887	-0,037	0,440

En el caso de la dilución de 3,5% la alcalinidad esperada según el modelo y la medida presentó valores similares, nuevamente se hace énfasis en que se presentan errores altos en las dosificaciones de concentraciones pequeñas. No obstante, la diferencia entre los valores comparados es pequeña. Lo anterior ocurre también en las medidas de pH y en el índice de saturación calculado; por otra parte, en la comparación de la concentración de calcio en las jarras se observan valores muy dispares entre los arrojados por el modelo y los medidos en laboratorio, siendo los experimentales casi la mitad de los esperados teóricamente, por lo que en este caso además de los errores mencionados anteriormente puede existir un error de interpretación a la hora del cálculo de la concentración de calcio por parte de la persona encargada del muestreo o del análisis de laboratorio, nuevamente se observa como la concentración de calcio no incrementa en algunas de las jarras a pesar de haberse añadiendo dosis mayores de estabilizante.

Tabla 7.5. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 4,5% de estabilizante

Día 1 – Dilución de lechada 4,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)₂	2,225 mg/L	4,45 mg/L	6,675 mg/L	8,9 mg/L	11,125 mg/L	13,35 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO₃/L)					
Phreeqc	4,907	7,910	10,913	13,916	16,919	19,922
Experimental	7,0	8,6	12,5	14,3	17,0	25,2
Error	43%	9%	15%	3%	0%	26%
Parámetro	pH					
Phreeqc	6,43	7,20	9,28	9,73	9,97	10,13
Experimental	6,69	7,52	8,89	9,22	9,48	9,89
Error	4%	4%	-4%	-5%	-5%	-2%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	5,524	6,725	7,926	9,128	10,329	11,530
Experimental	7,2	7,92	7,2	6,48	6,48	7,92
Error	30%	18%	-9%	-29%	-37%	-31%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-3,37	-2,31	-0,17	0,24	0,44	0,57
Experimental	-2,69	-1,73	-0,24	0,10	0,43	1,09

Para las concentraciones de la dilución de 4,5% se presentan valores dispares en el parámetro de alcalinidad en las concentraciones de la jarra 1 y la jarra 6, esto nuevamente puede atribuirse a errores en la titulación, puesto que la concentración de 3,5 mg/L de estabilizante en la prueba de jarras anterior presenta un valor de alcalinidad inferior, 6,8 mg CaCO_3/L , para una dosis mayor de estabilizante en una misma alícuota de la planta, esto corresponde a un absurdo, puesto que se espera que la alcalinidad incremente con una dosis mayor de estabilizante. Los valores de pH para este caso son muy similares presentando errores iguales o superiores al 5%. El índice de saturación también presenta diferencias pequeñas entre los valores esperados y medidos. En este caso se repite nuevamente los errores en la medición de la concentración de calcio, observando como esta no presenta variación entre las jarras 4 y 5.

En la figura 7.1 se graficó el índice de saturación de Langelier obtenido en función de las diferentes dosis de estabilizante aplicadas durante el día 1 en la PTAP de Puerto Mallarino. Aquí también se realiza la comparación grafica entre los valores esperados teóricamente, arrojados por el modelo matemático, contra los valores experimentales medidos en Laboratorio. En la figura 7.2 se presenta la comparación entre los valores de pH medidos para cada una de las muestras y el calculado por el modelo según la dosis aplicada, el valor arrojado por el modelo debería de corresponder a la dosis real aplicada y mostraría el índice respectivo para dicha dosis para los datos del mismo día.

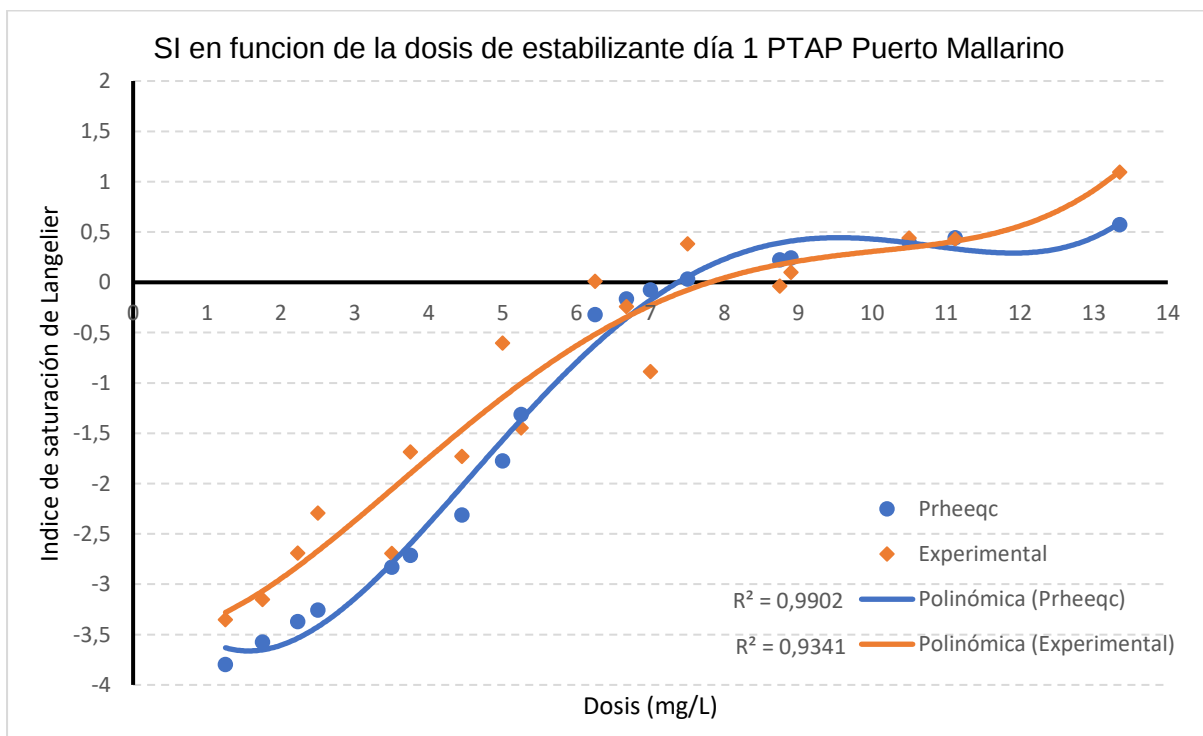


Figura 7.1. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 1 en la PTAP Puerto Mallarino

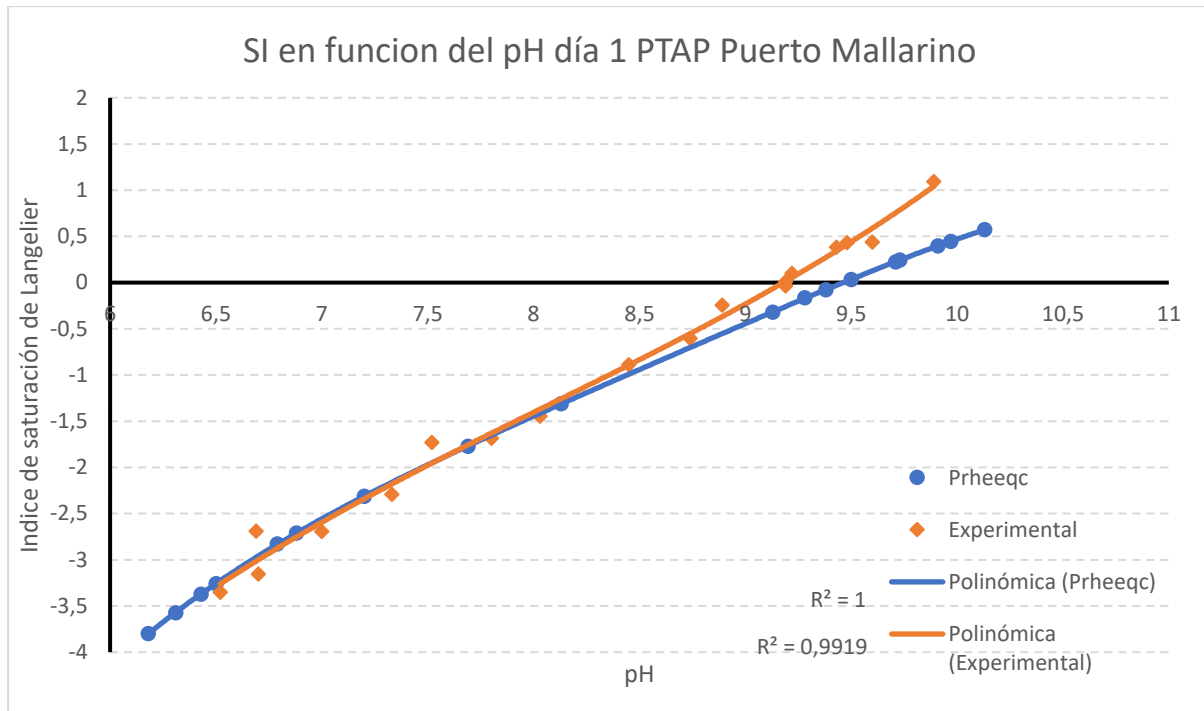


Figura 7.2. ISL en función del pH para el día 1 en la PTAP Puerto Mallarino

La figura 7.1 muestra como los valores teóricos y experimentales corresponden a una curva polinomial de grado 4. En ambos casos el coeficiente de determinación R^2 presenta un valor bastante cercano a 1, que indica que tan cercanos son los valores graficados de acuerdo con la ecuación de la línea de tendencia. En el caso de los valores experimentales, el valor del coeficiente de determinación dista más de 1, esto podría estar atribuido a los errores sistemáticos y aleatorios que tienen cabida en los procesos de titulación e inoculación de las dosis de estabilizante.

En la figura 7.1 también se puede evidenciar la dosis optima de estabilizante para el agua de la PTAP Puerto Mallarino durante el día 1, que, según el modelo para obtener un agua estabilizada, sin características corrosivas o incrustantes, se debería de agregar una dosis de aproximadamente 7,35 mg de estabilizante por cada litro de agua tratada. De acuerdo con esto, si la dosificación de estabilizante se hubiese hecho con la información obtenida de la prueba de jarras, se hubiese adicionado 0,54 mg de estabilizante en exceso por cada litro de agua tratada, lo que implicaría entregar agua ligeramente incrustante a la red, además de un gasto mayor de insumos.

El procedimiento anterior fue repetido para un segundo día en la planta Puerto Mallarino, los resultados fueron registrados en las tablas 7.6, 7.7 y 7.8. La tabla 7.6 presenta los datos correspondientes a la dilución de 2,5%, en ella se puede evidenciar problemas similares a los observados anteriormente, sobre todo en cálculo experimental de la concentración de calcio, donde sigue presentando valores iguales en concentraciones diferentes. La tabla 7.7 corresponde a los datos medidos de la dosificación de una dilución de estabilizante de 3,5%, en esta los valores de alcalinidad y pH medidos y esperados son bastante similares, la diferencia entre los índices de Langelier es baja; pero se sigue presentando el mismo error de cálculo de la concentración de calcio. Para finalizar el segundo día la tabla 7.8 muestra los datos de la concentración de 4,5% de estabilizante, aquí se observa un comportamiento similar al visto en los valores de las tablas 7.6 y 7.7

Tabla 7.6. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 2,5% de estabilizante

Día 2 – Dilución de lechada 2,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	1,25 mg/L	2,5 mg/L	3,75 mg/L	5 mg/L	6,25 mg/L	7,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	7,801	9,488	11,175	12,862	14,549	16,236
Experimental	6,7	9	11,4	12,9	15,2	17,9
Error	-14%	-5%	2%	0%	4%	10%
Parámetro	pH					
Phreeqc	6,36	6,55	6,77	7,06	7,58	8,80
Experimental	6,6	6,83	7,16	7,47	8,88	9,05
Error	4%	4%	6%	6%	17%	3%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	4,998	5,673	6,347	7,022	7,697	8,372
Experimental	5,04	6,48	6,48	8,64	9,36	9,36
Error	1%	14%	2%	23%	22%	12%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-3,286	-2,955	-2,621	-2,235	-1,624	-0,370
Experimental	-2,949	-2,484	-2,052	-1,565	-0,051	0,189

Tabla 7.7. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 3,5% de estabilizante

Día 2 - Dilución de lechada 3,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	1,75 mg/L	3,5 mg/L	5,25 mg/L	7 mg/L	8,75 mg/L	10,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	8,476	10,838	13,200	15,562	17,923	20,285
Experimental	8	11,1	14,3	15,700	17,2	21,6
Error	-6%	2%	8%	1%	-4%	6%
Parámetro	pH					
Phreeqc	6,438	6,726	7,130	8,376	9,251	9,557
Experimental	6,60	6,89	7,57	8,70	8,99	9,42
Error	3%	2%	6%	4%	-3%	-1%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	5,268	6,213	7,157	8,102	9,047	9,991
Experimental	7,92	7,92	8,64	8,64	8,64	8,64
Error	50%	27%	21%	7%	-4%	-14%

Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-3,152	-2,689	-2,142	-0,792	0,077	0,366
Experimental	-2,676	-2,246	-1,420	-0,251	0,077	0,602

Tabla 7.8. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 4,5% de estabilizante

Día 2 – Dilución de lechada 4,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	2,225 mg/L	4,45 mg/L	6,675 mg/L	8,9 mg/L	11,125 mg/L	13,35 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	9,117	12,120	15,123	18,126	21,129	24,132
Experimental	9,5	12,4	15,4	17,9	20,0	25,2
Error	4%	2%	2%	-1%	-5%	4%
Parámetro	pH					
Phreeqc	6,511	6,918	7,967	9,286	9,635	9,851
Experimental	6,82	7,48	8,3	8,98	9,36	9,66
Error	5%	8%	4%	-3%	-3%	-2%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	5,524	6,725	7,927	9,128	10,329	11,530
Experimental	7,2	7,92	8,64	8,64	8,64	8,64
Error	30%	18%	9%	-5%	-16%	-25%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-3,027	-2,416	-1,210	0,110	0,437	0,623
Experimental	-2,42	-1,61	-0,66	0,08	0,51	0,91

En la figura 7.3 se graficó el índice de saturación de Langelier obtenido en función de las diferentes dosis de estabilizante aplicadas durante el día 2 en la PTAP de Puerto Mallarino. Aquí también se realiza la comparación grafica entre los valores esperados teóricamente, arrojados por el modelo matemático, contra los valores experimentales medidos en laboratorio. Nuevamente en la figura 7.4 se grafican los valores de pH y su respectivo índice de saturación tanto para valores experimentales como teóricos para los datos del segundo día.

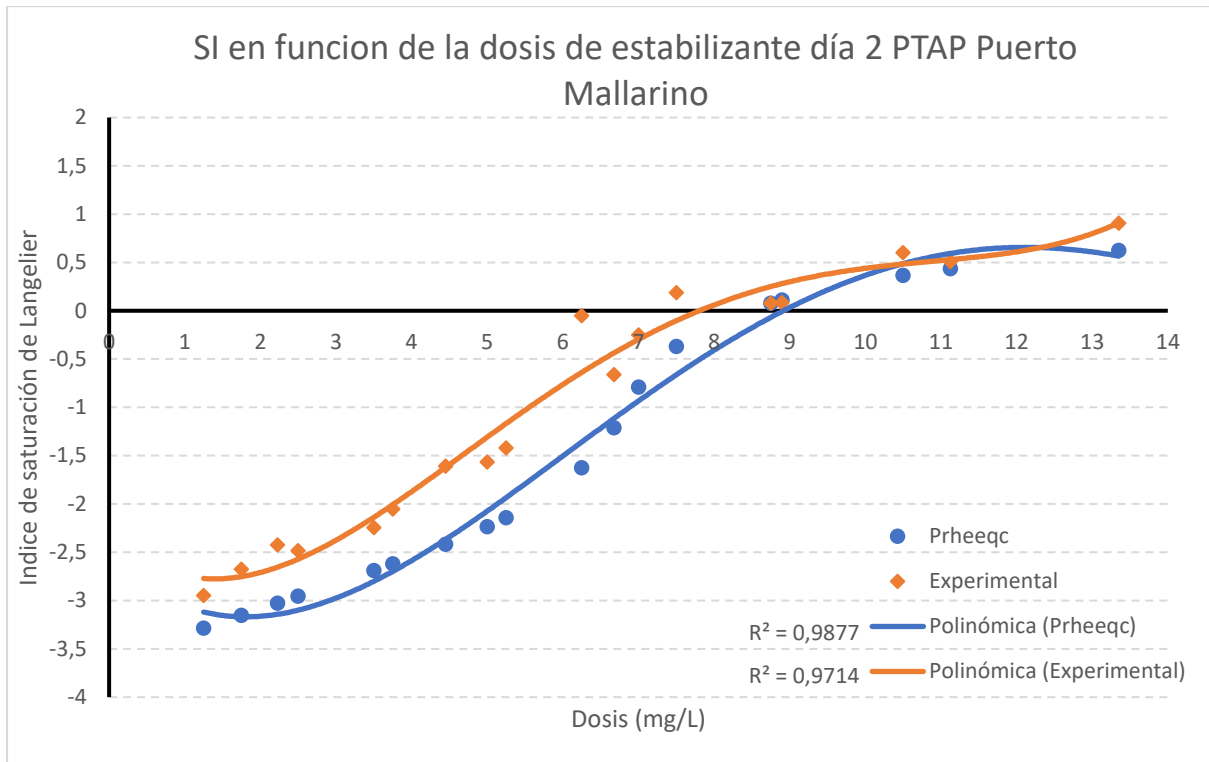


Figura 7.3. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 2 en la PTAP Puerto Mallarino

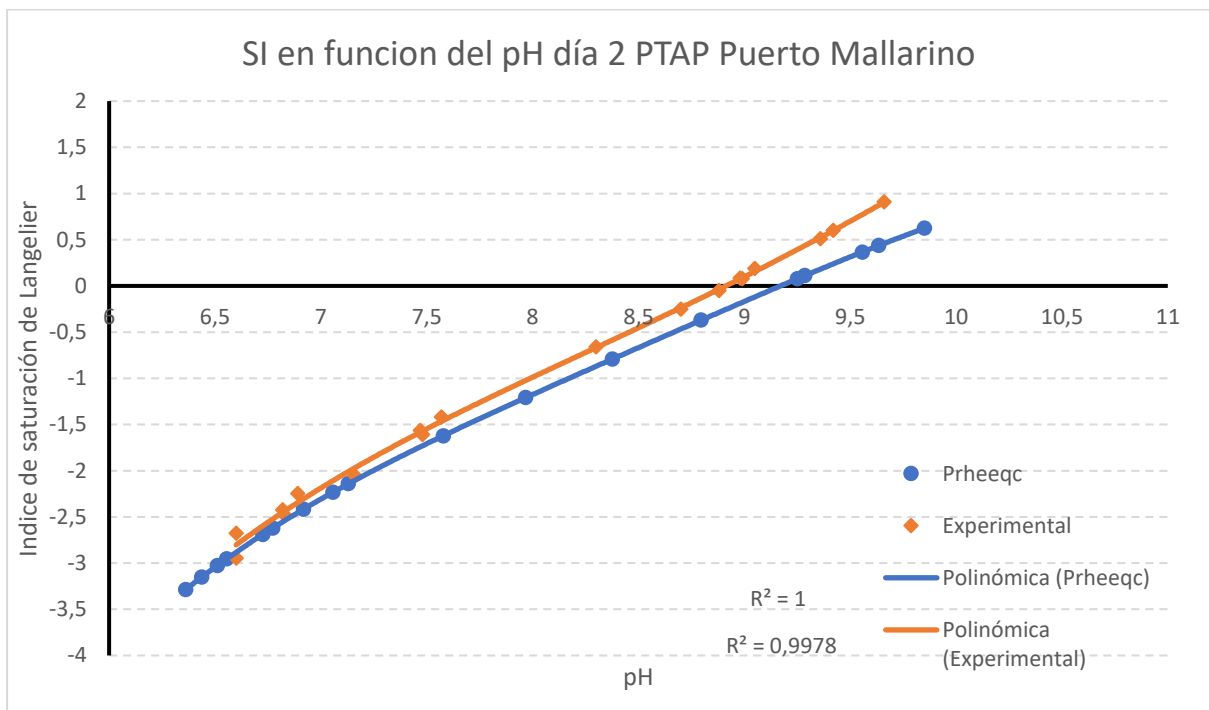


Figura 7.4. ISL en función del pH para el día 2 en la PTAP Puerto Mallarino

De manera coherente con la figura 7.1, la figura 7.3 muestra como ambos grupos de datos presentan una curva polinómica de grado 4, teniendo un valor de R^2 similar entre ambas curvas. No obstante, estas distan la una de la otra en las dosis óptimas de estabilizantes, donde contrario al caso del día 1, si se hubiese realizado la dosificación de estabilizante en la planta de acuerdo a la dosis de 7.8 mg de estabilizante por cada litro de agua tratada, según la prueba de jarras, se estaría entregando 1.1 mg de estabilizante menos de lo que se debió agregar a cada litro de agua tratada, lo que significaría entregar un agua posiblemente corrosiva y peligrosa para el sistema de distribución de la ciudad.

Para finalizar el análisis de los datos de la PTAP Puerto Mallarino, las tablas 7.9, 7.10 y 7.11 presentan los datos obtenidos del modelo matemático, así como los datos medidos en laboratorio de las pruebas de jarras, para diluciones de 2,5%, 3,5% y 4,5% respectivamente. La primera dilución presenta resultados similares a los observados en días anteriores, sin embargo, en este caso la concentración de calcio presenta valores más cercanos a los esperados y el error incrementa a medida que la dosis aumenta, también se evidencia como este error incrementa en las medidas de pH, lo que puede suponer una sub-dosificación en las muestras de las jarras 5 y 6. Es importante notar que las concentraciones de calcio se repiten, evidenciando nuevamente errores experimentales durante el cálculo y la medición de las muestras. Esto se repite en los valores de las diluciones siguientes.

Tabla 7.9. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 2,5% de estabilizante

Día 3 – Dilución de lechada 2,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	1,25 mg/L	2,5 mg/L	3,75 mg/L	5 mg/L	6,25 mg/L	7,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	9,304	10,991	12,678	14,365	16,052	17,739
Experimental	10	11,8	14	14,900	17,8	18,1
Error	7%	7%	10%	4%	11%	2%
Parámetro	pH					
Phreeqc	6,481	6,675	6,907	7,245	8,084	9,020
Experimental	6,64	6,85	7,22	7,21	7,37	7,41
Error	2%	3%	5%	0%	-9%	-18%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	7,879	8,554	9,228	9,903	10,578	11,253
Experimental	8.64	8.64	9.36	9,36	8,64	9,36
Error	10%	1%	1%	-5%	-18%	-17%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-2,907	-2,608	-2,283	-1,863	-0,958	-0,025
Experimental	-2,517	-2,236	-1,759	-1,742	-1,542	-1,461

Tabla 7.10. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 3,5% de estabilizante

Dia 3 – Dilución de lechada 3,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	1,75 mg/L	3,5 mg/L	5,25 mg/L	7 mg/L	8,75 mg/L	10,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	9,979	12,341	14,703	17,065	19,426	21,788
Experimental	11,8	13,4	15,2	17,200	21,5	22,7
Error	18%	9%	3%	1%	11%	4%
Parámetro	pH					
Phreeqc	6,556	6,856	7,342	8,790	9,346	9,609
Experimental	6,86	7,58	8,26	8,75	9,17	9,35
Error	5%	11%	12%	0%	-2%	-3%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	8,149	9,094	10,038	10,983	11,927	12,872
Experimental	7,92	8,64	10,08	10,08	10,8	10,8
Error	-3%	-5%	0%	-8%	-9%	-16%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-2,788	-2,352	-1,751	-0,249	0,285	0,521
Experimental	-2,263	-1,453	-0,652	-0,109	0,435	0,637

Tabla 7.11. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Puerto Mallarino, dilución de 4,5% de estabilizante

Dia 3 – Dilución de lechada 4,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	2,225 mg/L	4,45 mg/L	6,675 mg/L	8,9 mg/L	11,125 mg/L	13,35 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	10,620	13,623	16,626	19,629	22,632	25,635
Experimental	12,600	15,000	16,600	21,700	23,400	25,600
Error	19%	10%	0%	11%	3%	0%
Parámetro	pH					
Phreeqc	6,630	7,075	8,558	9,375	9,680	9,882
Experimental	6,89	7,6	8,59	9,24	9,3	9,66
Error	4%	7%	0%	-1%	-4%	-2%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	8,405	9,606	10,807	12,009	13,210	14,411
Experimental	7,2	8,64	9,36	9,36	9,36	10,08
Error	-14%	-10%	-13%	-22%	-29%	-30%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-2,674	-2,068	-0,479	0,311	0,582	0,744
Experimental	-2,25	-1,38	-0,32	0,45	0,54	0,97

La figura 7.5 muestra de manera gráfica los valores medidos y esperados para las muestras del tercer día en la PTAP Puerto Mallarino. Para el tercer día, se presentan los datos de índice de saturación en función del pH medido en la figura 7.6. Se observa como de los tres días, el tercer día fue el más accidentado, presentando valores desordenados y lejanos a la tendencia. Esto se hace aún más evidente cuando se observa el valor del R^2 en las curvas de tendencia, siendo el día con mayor diferencia entre dichos valores. Si se realiza el análisis de dosis optima, nuevamente se puede observar cómo en este caso también se estaría llevando a cabo una sobre dosificación, 8,63 mg en lugar de 7,95 mg por litro de agua tratada, lo que supondría un consumo extra de 0,68 mg por litro de agua tratada.

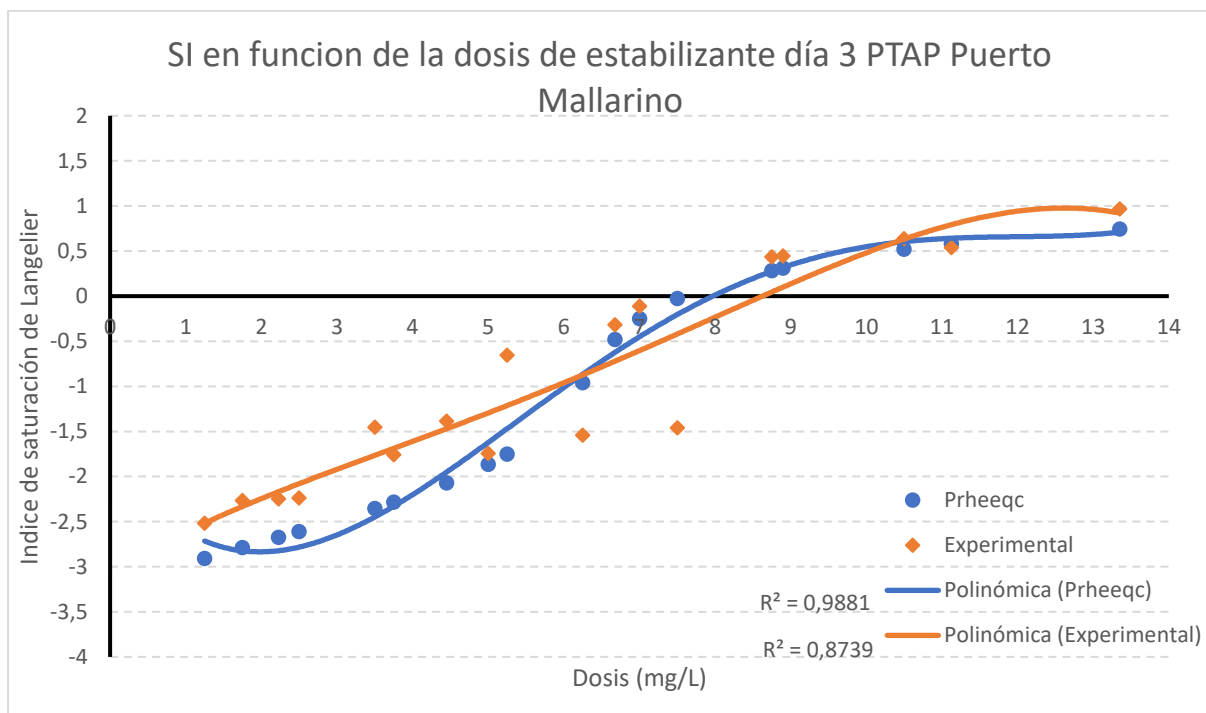


Figura 7.5. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 3 en la PTAP Puerto Mallarino

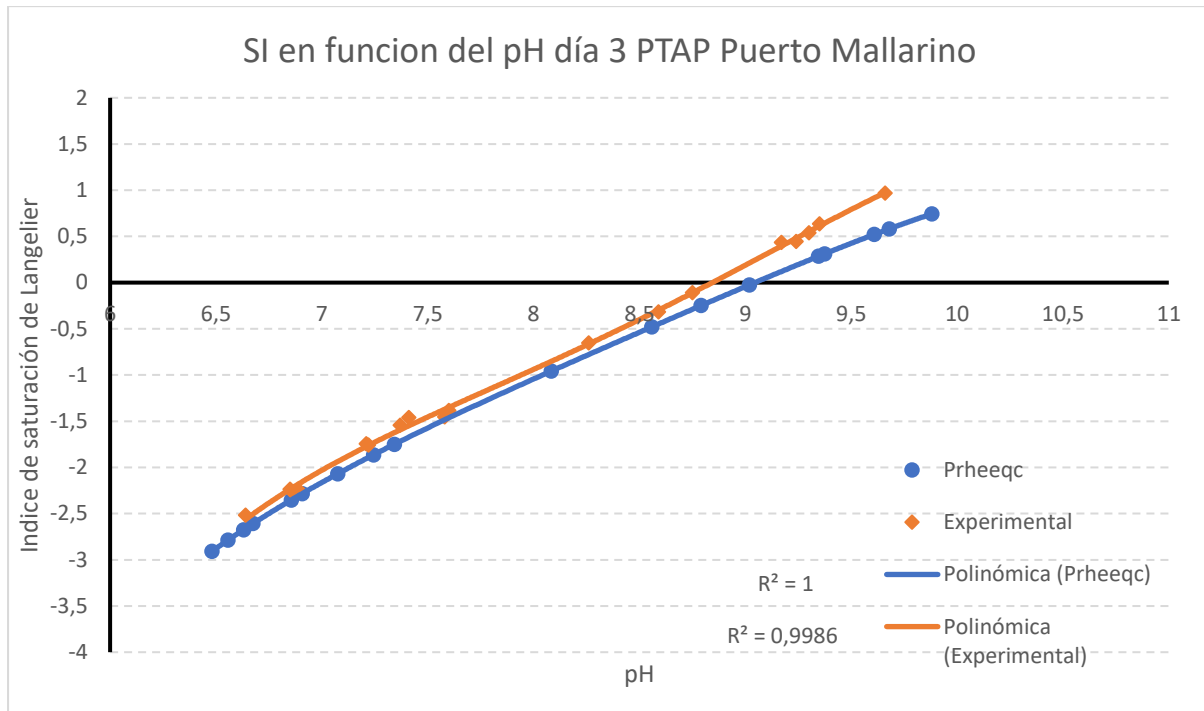


Figura 7.6. ISL en función del pH para el día 3 en la PTAP Puerto Mallarino

7.3. Comparación de datos modelados contra datos experimentales PTAP Rio Cauca

De manera homóloga a lo descrito en el literal 7.2 para realizar la comparación en la panta de potabilización Rio Cauca, se contrastaron los datos medidos en las pruebas de jarras realizadas en el estudio INFLUENCIA DE DOS COAGULANTES EN EL PROCESO DE ESTABILIZACION QUMICA EN LA POTABILIZACION DEL AGUA DEL RIO CAUCA llevado a cabo por Rodríguez (2018), que fueron utilizados para realizar el cálculo del índice de Langelier, contra los datos calculados por el modelo. Cabe resaltar que en la PTAP de Rio Cauca se utilizaba hidroxiclورو de aluminio como coagulante. En las tablas 7.12, 7.13 y 7.14 se muestra la comparación entre los datos obtenidos en las pruebas de jarras y los arrojados por el modelo, para las alícuotas del primer día donde se llevaron a cabo las pruebas experimentales para los parámetros seleccionados, así como el respectivo error que se presentó ante los valores de los resultados.

Tabla 7.12. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Rio Cauca, dilución de 1,5% de estabilizante

Día 1 – Dilución de lechada 1,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	0,75 mg/L	1,5 mg/L	2,25 mg/L	3 mg/L	3,75 mg/L	4,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3/L)					
Phreeqc	16,243	17,255	18,268	19,280	20,292	21,304
Experimental	16,4	17,1	18,2	20,400	23,7	25,2
Error	1%	-1%	0%	6%	17%	18%

Parámetro	pH					
Phreeqc	7,096	7,303	7,632	8,308	8,864	9,134
Experimental	7,01	7,09	7,35	7,96	8,63	8,99
Error	-1%	-3%	-4%	-4%	-3%	-2%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	6,167	6,572	6,977	7,382	7,787	8,191
Experimental	4,32	4,32	5,04	5,04	5,76	6,48
Error	-30%	-34%	-28%	-32%	-26%	-21%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-2,165	-1,907	-1,529	-0,819	-0,257	0,013
Experimental	-2,234	-2,136	-1,784	-1,126	-0,336	0,101

En el caso de la primera dilución durante el primer día de muestreo, se puede observar cómo los valores de alcalinidad son bastante acertados en concentraciones bajas, sin embargo, estos comienzan a incrementar su error en las dosis más altas de estabilizante. Para esta dilución los valores de pH no varían mucho con respecto a los esperados, no obstante, en estas muestras sucede lo mismo que en la PTAP Puerto Mallarino con los valores de la concentración de calcio, lo que ratifica un error en el método por el cual este parámetro fue medido.

Tabla 7.13. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Rio Cauca, dilución de 2,5% de estabilizante

Dia 1 – Dilución de lechada 2,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH) ₂	1,25 mg/L	2,5 mg/L	3,75 mg/L	5 mg/L	6,25 mg/L	7,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)					
Phreeqc	16,918	18,605	20,292	21,979	23,666	25,353
Experimental	17,5	18,1	29,8	20,900	24,5	26,8
Error	3%	-3%	47%	-5%	4%	6%
Parámetro	pH					
Phreeqc	7,225	7,805	8,864	9,257	9,476	9,632
Experimental	7,23	7,33	8,32	8,38	8,98	9,33
Error	0%	-6%	-6%	-9%	-5%	-3%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	6,437	7,112	7,787	8,461	9,136	9,811
Experimental	7,2	7,92	7,2	7,92	7,92	8,64
Error	12%	11%	-8%	-6%	-13%	-12%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-2,001	-1,343	-0,257	0,134	0,346	0,493
Experimental	-1,764	-1,609	-0,446	-0,500	0,167	0,591

Para la segunda dilución los valores de alcalinidad fueron bastante acertados, con excepción de la jarra 3 que presentó un error elevado. Los valores de pH se observan consecuentes con lo esperado. Para esta lista de datos los valores de calcio se aproximan a los esperados, sin embargo se observan comportamientos extraños, como una disminución de la concentración de calcio a una mayor dosis de estabilizante o valores de concentración igual a dosis diferentes de Ca(OH)_2 .

Tabla 7.14. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 1 PTAP Rio Cauca, dilución de 3,5% de estabilizante

Día 1 – Dilución de lechada 3,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	1,75 mg/L	3,5 mg/L	5,25 mg/L	7 mg/L	8,75 mg/L	10,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	17,593	19,955	22,317	24,679	27,040	29,402
Experimental	19,0	20,8	22,1	25,9	28,9	35,5
Error	8%	4%	-1%	5%	7%	21%
Parámetro	pH					
Phreeqc	7,392	8,729	9,309	9,575	9,755	9,895
Experimental	7,51	8,21	8,66	8,95	9,32	9,69
Error	2%	-6%	-7%	-7%	-4%	-2%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	6,707	7,652	8,597	9,541	10,486	11,431
Experimental	7,2	7,92	7,92	8,64	8,64	8,64
Error	7%	4%	-8%	-9%	-18%	-24%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-1,800	-0,393	0,185	0,440	0,605	0,726
Experimental	-1,45	-0,67	-0,20	0,20	0,61	1,07

Para la última dilución del día 1 se observa el mismo comportamiento de la dilución de 2,5%, presentando anomalías en los valores de la concentración de calcio que no corresponden a lo esperado con las variaciones realizadas en la inoculación del estabilizante en las alícuotas.

En la figura 7.7 se observa el resumen del día 1 del índice de saturación en función de la dosis aplicada de estabilizante, mientras que en la figura 7.8 se muestra el índice de saturación en función del pH, aquí se observa las curvas correspondientes a los datos esperados y los medidos. De la comparación de estas dos curvas se puede observar cómo ambas presentan un buen valor de R^2 lo que indica que los valores experimentales no se dispersan mucho de la curva descrita por la regresión polinómica. No obstante, los valores experimentales distan de los calculados por el modelo, sobre todo en la zona de estabilización, donde el índice de Langelier es cercano a cero, por lo que a la hora de calcular la dosis optima se presenta una diferencia considerable si se calcula con los valores experimentales o los arrojados por el modelo. Para el caso de los datos medidos, la dosis

óptima de estabilizante es de 7,1 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por cada litro de agua tratada; mientras que según el modelo esta dosis debería ser de 4,6 mg de estabilizante por cada litro de agua tratada, lo que implicaría una sobre dosificación de 2,5 mg de estabilizante por cada litro de agua tratado, generando sobre costos y posibles problemas de incrustación en el sistema de distribución.

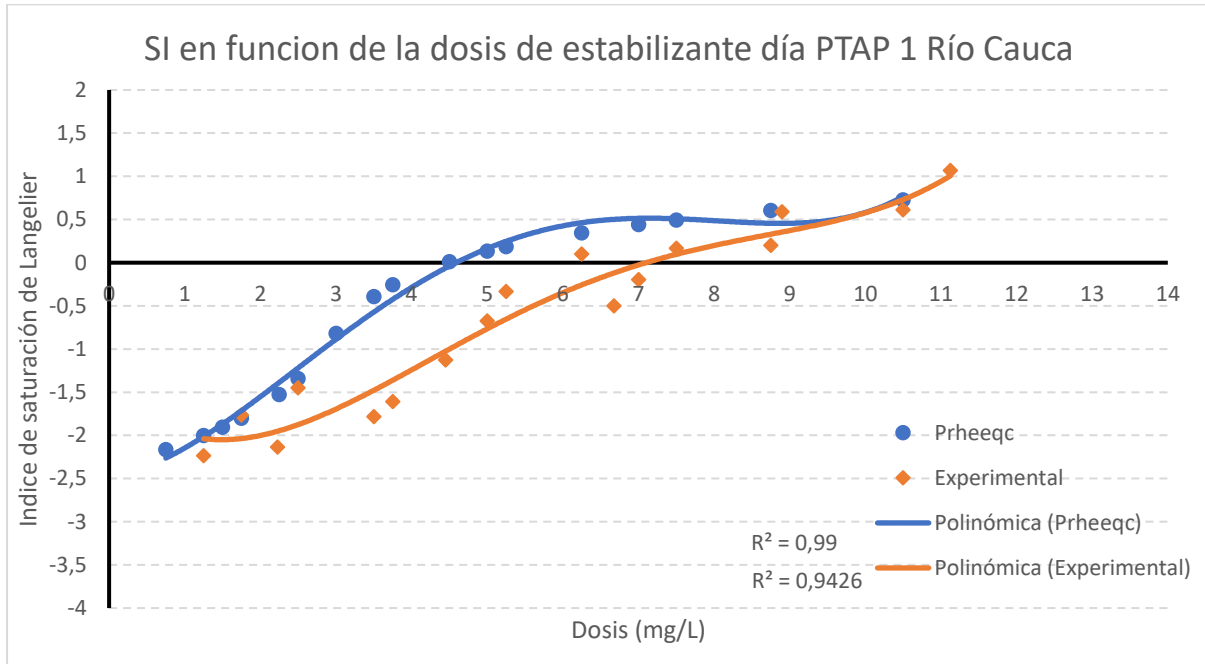


Figura 7.7. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 1 en la PTAP Río Cauca

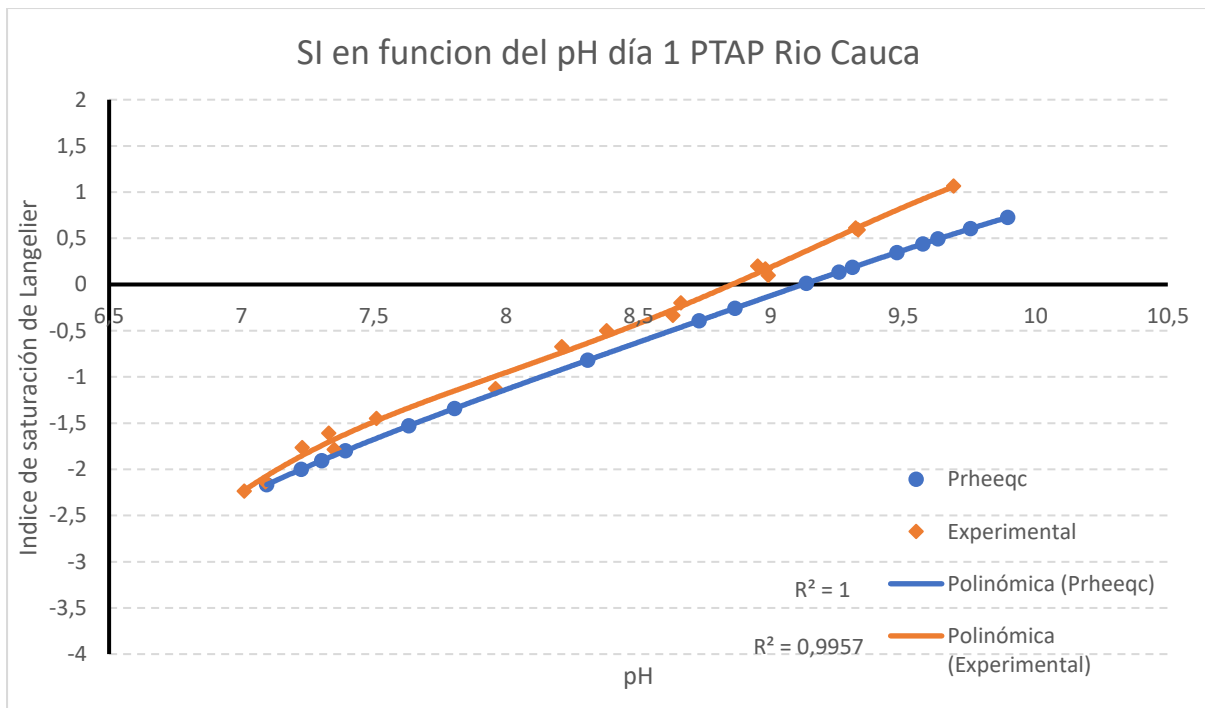


Figura 7.8. ISL en función del pH para el día 1 en la PTAP Río Cauca

Los resultados del segundo día de mediciones en la PTAP Rio Cauca se presentan en las tablas 7.15, 7.16 y 7.17, mostrando los datos para diluciones de 1,5%, 2,5% y 3,5% de lechada de cal o $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Tabla 7.15. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Rio Cauca, dilución de 1,5% de estabilizante

Dia 2 – Dilución de lechada 1,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	0,75 mg/L	1,5 mg/L	2,25 mg/L	3 mg/L	3,75 mg/L	4,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3/L)					
Phreeqc	21,057	22,069	23,082	24,094	25,106	26,118
Experimental	21	22	24,7	25,3	26,7	27
Error	0%	0%	7%	5%	6%	3%
Parámetro	pH					
Phreeqc	7,056	7,197	7,382	7,663	8,179	8,720
Experimental	7,41	7,67	8	8,15	8,43	8,45
Error	5%	7%	8%	6%	3%	-3%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	5,448	5,852	6,258	6,662	7,067	7,472
Experimental	5,04	5,04	5,04	6,48	7,2	7,2
Error	-7%	-14%	-19%	-3%	2%	-4%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-2,134	-1,944	-1,711	-1,388	-0,837	-0,284
Experimental	-1,652	-1,372	-0,993	-0,725	-0,377	-0,352

El segundo día no difiere mucho en cuanto los datos obtenidos durante el primer día de muestreo. Nuevamente se evidencia el error en el cálculo de la concentración de calcio, esto dado a que se presentan los mismos valores en la concentración para las jarras 1 a 3 aun cuando se adiciona dosis del estabilizante diferentes en cada jarra.

Tabla 7.16. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Rio Cauca, dilución de 2,5% de estabilizante

Dia 2 – Dilución de lechada 2,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	1,25 mg/L	2,5 mg/L	3,75 mg/L	5 mg/L	6,25 mg/L	7,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3/L)					
Phreeqc	21,732	23,419	25,106	26,793	28,480	30,167
Experimental	21,3	23,8	26,5	27,400	30,5	32,5
Error	-2%	2%	6%	2%	7%	8%

Parámetro	pH					
Phreeqc	7,146	7,461	8,179	8,928	9,237	9,428
Experimental	7,47	7,61	8,09	8,49	8,82	9,26
Error	5%	2%	-1%	-5%	-5%	-2%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	5,718	6,392	7,067	7,742	8,417	9,092
Experimental	5,04	5,04	5,04	7,2	7,2	8,64
Error	-12%	-21%	-29%	-7%	-14%	-5%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-2,010	-1,618	-0,837	-0,073	0,238	0,428
Experimental	-1,586	-1,399	-0,874	-0,306	0,069	0,613

Para la segunda dilución nuevamente el pH es el parámetro con mayor similitud entre los datos medidos y los esperados. También se observa similitud en los datos de los valores para el parámetro de alcalinidad.

Tabla 7.17. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 2 PTAP Rio Cauca, dilución de 3,5% de estabilizante

Día 2 – Dilución de lechada 3,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	1,75 mg/L	3,5 mg/L	5,25 mg/L	7 mg/L	8,75 mg/L	10,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	22,407	24,769	27,131	29,493	31,854	34,216
Experimental	22,0	25,4	27,4	30,8	32,0	35,0
Error	-2%	3%	1%	4%	0%	2%
Parámetro	pH					
Phreeqc	7,252	7,971	9,007	9,360	9,568	9,721
Experimental	7,58	8,61	8,74	8,92	9,25	9,45
Error	5%	8%	-3%	-5%	-3%	-3%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	5,988	6,932	7,877	8,822	9,766	10,711
Experimental	7,2	7,2	8,64	8,64	8,64	7,92
Error	20%	4%	10%	-2%	-12%	-26%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-1,872	-1,055	0,007	0,360	0,564	0,708
Experimental	-1,31	-0,22	0,02	0,25	0,60	0,80

Para finalizar el segundo día, en el caso de la tercera dilución se observa como son los valores de calcio medidos de las jarras 3 a 5 los que se repiten, aun cuando a la jarra 5 se le aplica 3,5 mg/L más de estabilizante.

En la figura 7.9 se observa el resumen del índice de saturación de Langelier en función de la dosis de estabilizante aplicado para la calidad de agua del segundo día muestreado, además, en la figura 7.10 se muestra el gráfico del índice de saturación en función del pH para este respectivo día. Aquí se observa como para este caso, las curvas son considerablemente diferentes, siendo la descrita por los datos arrojados por el modelo una polinómica de grado 4 como en el resto de los casos, mientras que los datos medidos en laboratorio presentan una curva casi lineal. Nuevamente calculando la dosis óptima para el segundo día, se tiene un valor de 5,4mg y 7,3 mg de estabilizante por cada litro de agua tratada, para los datos calculados y medidos respectivamente. En este caso se estaría realizando una sobre dosificación de 1,9 mg de estabilizante por cada litro de agua tratada.

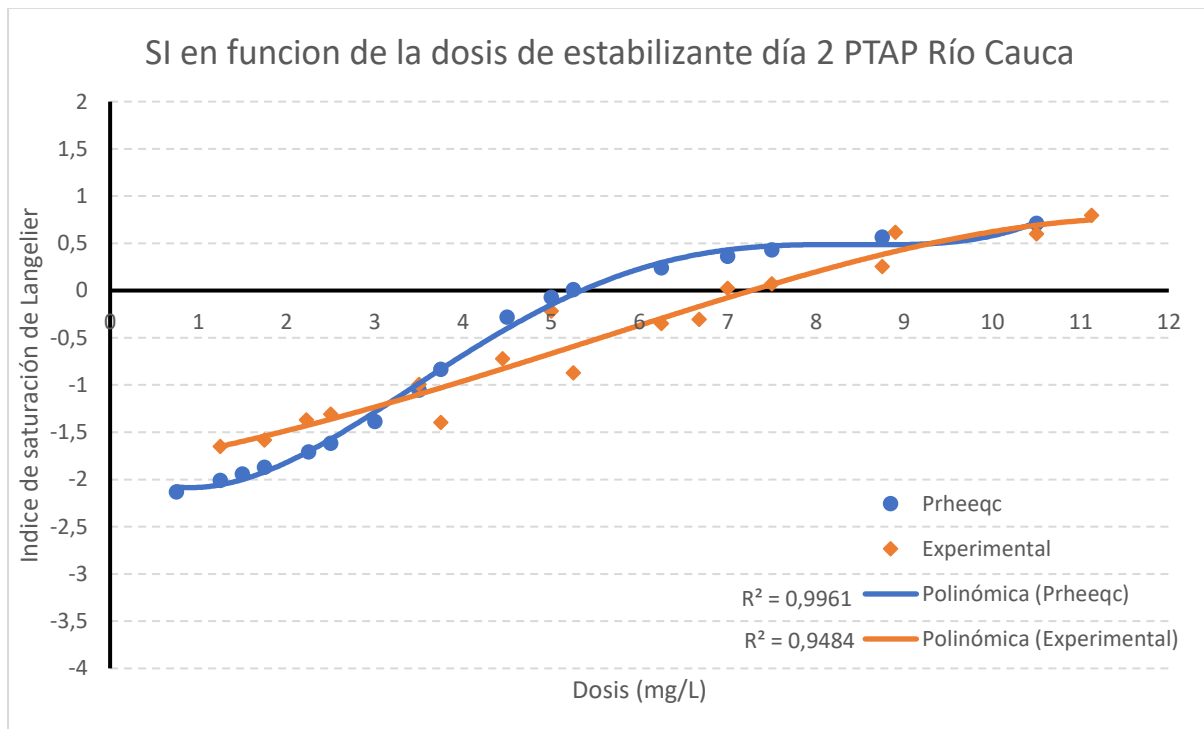


Figura 7.9. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 2 en la PTAP Río Cauca

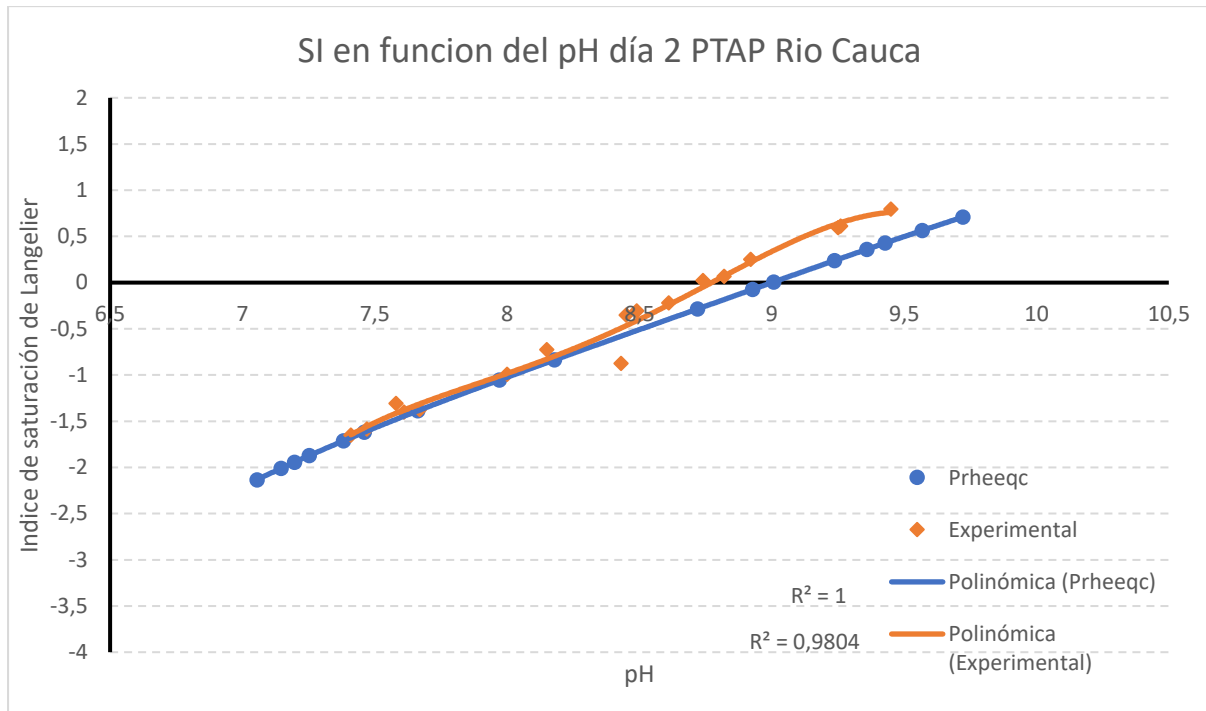


Figura 7.10. ISL en función del pH para el día 2 en la PTAP Río Cauca

Para finalizar la toma de datos, se realizó el tercer día consecutivo de prueba de jarras de las diferentes dosificaciones al agua clorada de la PTAP Río Cauca. Los resultados obtenidos de dichas mediciones se presentan en las tablas 7.18, 7.19 y 7.20, para las diluciones de lechada de cal hidratada al 1,5%, 2,5% y 3,5% respectivamente.

Tabla 7.18. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Río Cauca, dilución de 1,5% de estabilizante

Día 3 – Dilución de lechada 1,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	0,75 mg/L	1,5 mg/L	2,25 mg/L	3 mg/L	3,75 mg/L	4,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	22,058	23,070	24,083	25,095	26,107	27,119
Experimental	23	23,7	24,9	25,3	26,9	29,2
Error	4%	3%	3%	1%	3%	8%
Parámetro	pH					
Phreeqc	7,163	7,333	7,580	8,015	8,601	8,936
Experimental	7,33	7,49	7,75	8,21	8,51	8,71
Error	2%	2%	2%	2%	-1%	-3%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	8,329	8,733	9,139	9,543	9,948	10,353
Experimental	8,64	9,36	9,36	10,8	11,52	8,64
Error	4%	7%	2%	13%	16%	-17%

Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-1,830	-1,622	-1,339	-0,874	-0,276	0,058
Experimental	-1,466	-1,258	-0,978	-0,450	-0,096	0,014

Para la primera dilución se observan valores aceptables en los parámetros de alcalinidad y pH, sin embargo, se sigue repitiendo el error en la medición de la concentración de calcio. Para las siguientes dos diluciones se repite este mismo patrón, que también es evidenciable en los datos correspondientes a la PTAP Puerto Mallarino. Cabe resaltar que, en este día en particular, los datos de índice de saturación calculados a partir de los datos medidos son cercanos a los arrojados por el modelo.

Tabla 7.19. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Rio Cauca, dilución de 2,5% de estabilizante

Dia 3 – Dilución de lechada 2,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH) ₂	1,25 mg/L	2,5 mg/L	3,75 mg/L	5 mg/L	6,25 mg/L	7,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)					
Phreeqc	22,733	24,420	26,107	27,793	29,480	31,167
Experimental	24	25,5	26,5	27,500	30,4	31,7
Error	6%	4%	2%	-1%	3%	2%
Parámetro	pH					
Phreeqc	7,271	7,694	8,601	9,079	9,321	9,486
Experimental	7,47	8,18	8,44	8,58	9,00	9,11
Error	3%	6%	-2%	-5%	-3%	-4%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	8,599	9,273	9,948	10,623	11,298	11,973
Experimental	7,2	7,92	8,64	8,64	7,92	10,8
Error	-16%	-15%	-13%	-19%	-30%	-10%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-1,697	-1,214	-0,276	0,198	0,433	0,588
Experimental	-1,386	-0,610	-0,296	-0,142	0,282	0,544

Tabla 7.20. Resultados del modelo comparados con los datos experimentales día 3 PTAP Rio Cauca, dilución de 3,5% de estabilizante

Dia 3 – Dilución de lechada 3,5%						
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	1,75 mg/L	3,5 mg/L	5,25 mg/L	7 mg/L	8,75 mg/L	10,5 mg/L
Parámetro	Alcalinidad (mg CaCO_3 /L)					
Phreeqc	23,408	25,770	28,131	30,493	32,854	35,216
Experimental	23,600	26,500	27,200	30,400	33,000	35,600
Error	1%	3%	-3%	0%	0%	1%
Parámetro	pH					
Phreeqc	7,404	8,430	9,137	9,426	9,613	9,756
Experimental	7,77	8,81	8,96	9,22	9,43	9,47
Error	5%	5%	-2%	-2%	-2%	-3%
Parámetro	Calcio (mg/L)					
Phreeqc	8,869	9,813	10,758	11,703	12,647	13,592
Experimental	7,92	9,36	9,36	9,36	8,64	10,08
Error	-11%	-5%	-13%	-20%	-32%	-26%
Parámetro	Índice de saturación (Langelier)					
Phreeqc	-1,539	-0,449	0,256	0,532	0,704	0,829
Experimental	-1,05	0,11	0,27	0,57	0,78	0,92

Para finalizar, la figura 7.11 muestra el comportamiento antes mencionado, donde se observa como en varias partes de la curva, los índices de saturación calculados a partir de los datos medidos y los arrojados por el modelo coinciden. A pesar de esto, las curvas se separan en la zona de estabilización del agua, que representa un índice de Langelier o saturación de carbonato de calcio igual a cero, es aquí donde se determina la dosis optima y siguiendo la curva descrita por los datos medidos en laboratorio, se estaría sobre dosificando con estabilizante el agua tratada, representando gastos importantes, así como constituyendo un peligro para la salud del sistema de distribución de agua. Sacando la dosis optima se tendría 6 mg de estabilizante por cada litro de agua tratada en el caso de calcularse mediante los datos medidos y 5,6 mg de estabilizante por cada litro de agua tratada en el caso de los datos calculados por el modelo. De manera anexa la figura 7.12 presenta el grafico correspondiente al índice de saturación para los datos medidos y calculados en función del pH.

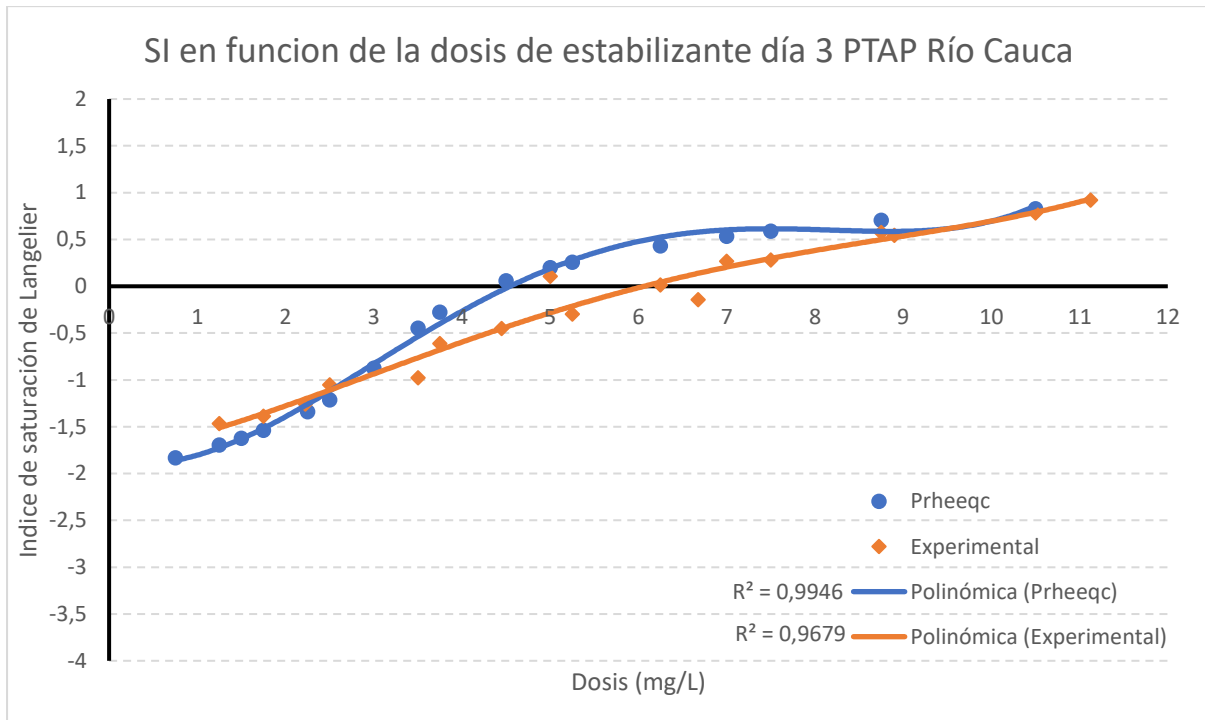


Figura 7.11. ISL en función de la dosis de estabilizante aplicado para el día 3 en la PTAP Río Cauca

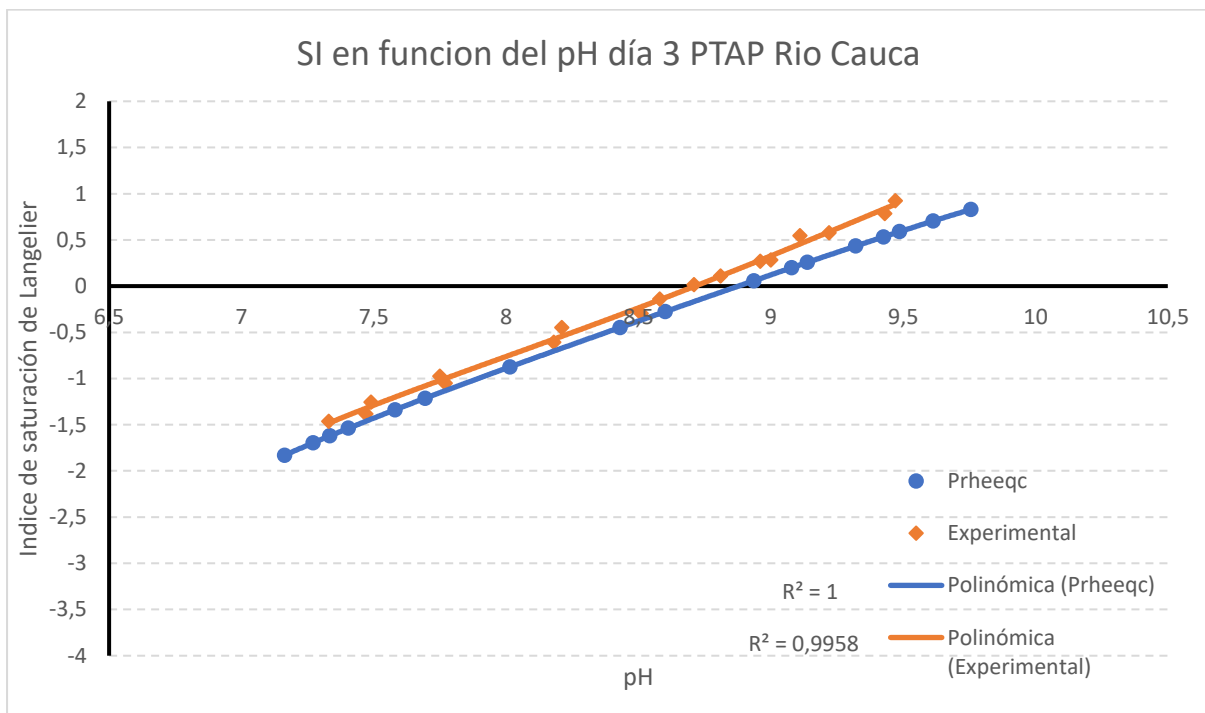


Figura 7.12. ISL en función del pH para el día 3 en la PTAP Río Cauca

Los datos correspondientes a las dosis óptimas de cada día de muestreo en cada una de las plantas se muestra en la tabla 7.21. Aquí se puede observar como las dosis que debían ser aplicadas calculadas por el modelo matemático y las que fueron calculadas a través de los datos recolectados en laboratorio no presentan una diferencia significativa en la PTAP Puerto Mallarino; sin embargo, esto no ocurre en la PTAP Rio Cauca, donde las dosis óptimas experimentales difieren casi en el doble de las dosis óptimas modeladas, esto significaría un gasto considerable en la operación de la planta, específicamente en el proceso de estabilización del agua, así como un riesgo previsible para la salud de la red del sistema de distribución, puesto que una sobredosificación tan grande podría generar problemas severos de incrustación en el sistema incrementando los costos por mantenimiento y reduciendo los diámetros de las tuberías incrementando los costos de operación.

Tabla 7.21. Resumen de dosis de Cal Apagada (mg/L) requeridas para llevar el índice de saturación de Langelier a cero en el proceso de estabilización química de las plantas de Potabilización de Puerto Mallarino y Rio Cauca de acuerdo con datos experimentales (Rodríguez, 2018) y los resultados de modelación con PRHEEQC

Fuente de datos	PTAP		Diferencia entre PTAPs	
	Puerto Mallarino	Rio Cauca	Valor	%
Día 1				
Modelo PHREEQC	7,35	4,3	3,05	41,5
Experimental	7,89	7,1	0,79	10,0
Día 2				
Modelo PHREEQC	8,9	5,4	3,5	39,3
Experimental	7,8	7,3	0,5	6,4
Día 3				
Modelo PHREEQC	7,95	4,5	3,45	43,4
Experimental	8,63	6	2,63	30,5
Promedio Modelo PHREEQC	8,1	5,1	3,0	36,8
Promedio Experimental	8,1	6,8	1,31	16,1
Diferencia Experimental Vs Modelo (valor)	0,04	1,70		
Diferencia Experimental Vs Modelo (%)	0,5	25,0		

En la Tabla 7.21 se evidencia la similitud en los valores obtenidos de dosis experimentales y modelados para la planta de Puerto Mallarino, el cual es de 1,7 mg/L entre ambos valores obtenidos de dosis experimental y modelados de cal en la planta de rio Cauca el cual equivale a una diferencia del 25% con respecto a lo aplicado en puerto Mallarino.

El modelo plantea una diferencia de 3,0 mg/L entre la dosis a aplicar en Puerto Mallarino y la Planta de Río Cauca, lo cual corresponde a una diferencia del 36,8% con respecto a la dosis aplicada en la planta de Puerto Mallarino, mientras que los resultados experimentales plantean una diferencia de 1,7 mg/L entre la dosis a aplicar en Puerto Mallarino y la Planta de Río Cauca, lo cual corresponde a una diferencia del 16,1% con respecto a la dosis aplicada en la planta de Puerto Mallarino.

La diferencia entre los resultados promedios experimentales y los modelados para la planta de Puerto Mallarino son de solo 0,04 mg/L lo cual equivale a un error de 0,5%, mientras que para la planta de Río Cauca los resultados promedios experimentales y los modelados difieren en 1,70 mg/L lo cual equivale a un error del 25,0%.

Tabla 7.22. Resumen de Valores de pH en el agua tratada requeridos para llevar el índice de saturación de Langelier a valor cero en el proceso de estabilización química de las plantas de Potabilización de Puerto Mallarino y Río Cauca de acuerdo con datos experimentales (Rodríguez, 2018) y los resultados de modelación con PHREEQC

Fuente de Información	PTAP		Diferencia entre PTAPs	
	Puerto Mallarino	Río Cauca	Valor	%
Día 1				
Modelo PHREEQC	9,50	9,30	0,2	2,1
Experimental	9,25	8,80	0,45	4,9
Día 2				
Modelo PHREEQC	9,25	9,00	0,25	2,7
Experimental	9,00	8,80	0,2	2,2
Día 3				
Modelo PHREEQC	9,00	8,9	0,1	1,1
Experimental	8,80	8,7	0,1	1,1
Mediana Modelo PHREEQC	9,25	9,00	0,25	2,7
Mediana Experimental	9,00	8,80	0,20	2,2
Diferencia Experimental Vs Modelo (valor)	-0,25	-0,20		
Diferencia Experimental Vs Modelo (%)	-2,7	-2,3		

En la Tabla 7.22 se evidencia la similitud en las medidas de los valores de pH experimentales y modelados para la estabilización del agua del río Cauca en las dos plantas, estableciéndose el valor de la mediana de pH en ambas plantas en aproximadamente $9,0 \pm 0,2$. Además se presenta una diferencia de valores de pH de 0,20 que equivale a un 2,3% del valor encontrado entre los datos experimentales y los modelados para la planta de Río Cauca. De esa misma manera el modelo plantea una diferencia de valores de pH en 0,25 unidades para llevar el índice de Langelier a cero entre la planta de Puerto Mallarino y la Planta de Río Cauca, lo cual equivale una diferencia en porcentaje de 2,7%, mientras que los resultados experimentales presentan una diferencia de 0,20 Unidades entre los valores de pH entre ambas plantas, lo cual corresponde a una diferencia en porcentaje de 2,2%.

Las diferencias encontradas en las dosis óptimas a aplicar en la planta de Río Cauca, son mayores a las diferencias en valores y porcentajes encontradas en los valores de pH para alcanzar el valor cero del índice de Langelier. Lo cual señala la conveniencia de utilizar el pH del agua tratada como indicador rápido de la estabilidad química del agua producida en las dos plantas. Los resultados obtenidos sugieren que desde el punto de vista de la estabilidad química del agua el empleo del hidroxiclورو de aluminio permite reducir en aproximadamente un tercio la dosificación de cal. Considerando los valores de pH del agua tratada de las dos plantas en el año 2016 y utilizando el índice de Langelier como indicador, se deduce que ambas plantas producen la mayor parte del tiempo agua con condiciones agresivas y dosifican cal por debajo de los valores requeridos para estabilizar el agua.

Es importante puntualizar que ambas plantas tienen por fuente abastecedora el Río Cauca, pero la implementación de sus procesos es distinta. Durante la toma de muestras en la PTAP Río Cauca se hizo uso del coagulante hidroxiclورو de aluminio, mientras que en la PTAP Puerto Mallarino fue utilizado el clورو férrico en el proceso de coagulación, proceso previo a la estabilización, siendo el segundo antes mencionando una solución que consume más alcalinidad presente en el agua, por lo que por consiguiente se esperaría que en una planta que utilice dicho químico sea necesaria una mayor concentración de estabilizante, con el fin de compensar ese consumo de alcalinidad. No obstante, si se compara la dosis óptima experimental promedio entre las dos plantas, se observa como dichas dosis son similares en un 16,1%, mientras que las dosis óptimas del modelo PHREEQC se evidencia una diferencia de dosis promedio entre plantas de 36,8%.

Como comentario final es importante mencionar que como dato de calibración para el modelo matemático se debería de tomar el valor de pH, puesto que este es el valor más exacto obtenido en laboratorio, al ser medido por un medidor de pH digital y siguiendo el método estándar para realizar dicha medición, estos valores junto con el modelo se podría calcular variaciones en las dosis aplicadas durante las pruebas de jarras.

8. CONCLUSIONES

- La utilización del modelo hidroggeoquímico PHREEQC permitió determinar las características de la estabilidad química de las aguas cloradas de las plantas de potabilización Puerto Mallarino y Río Cauca, indicando condiciones altamente corrosivas. El uso del modelo permitirá un monitoreo continuo de esta característica del agua, luego de los procesos de coagulación-floculación y cloración.
- El modelo permite evaluar el control de calidad analítico de la caracterización físicoquímica del agua, procurando suministrar una información de alta calidad.
- Por medio del análisis mediante el modelo hidroggeoquímico PHREEQC se determinó la precisión de los datos arrojados por el modelo, que además de arrojar datos fiables, permite comprobar la calidad de los datos medios de manera experimental encontrando incongruencias como que la concentración del calcio en el agua no aumentaba a medida que se aumentaba la dosis de estabilizante.
- La comparación de los datos experimentales con los arrojados por el modelo también permitió concluir la efectividad de los datos de pH como parámetro de validación, esto dada la naturaleza del método instrumental con el que se llevan a cabo las mediciones. La herramienta desarrollada en el presente trabajo de grado también sería de utilidad para verificar las dosis aplicadas en las pruebas de jarras, debido a que una dosificación errónea se vería evidenciada en el valor de pH.
- Para el caso de la planta de potabilización de Puerto Mallarino los porcentajes de error encontrados entre los datos de pH del agua estabilizada arrojados por el modelo y los medidos experimentalmente son relativamente bajos, presentando una varianza promedio de 0,40 unidades de pH con un valor moda de 0,39 unidades de pH.
- En el caso de la planta de potabilización de Río Cauca los porcentajes de error fueron igualmente bajos entre los datos de pH del agua estabilizada arrojados por el modelo y los medidos experimentalmente, se encontró una varianza promedio de 0,32 unidades de pH. Sin embargo, la varianza de los valores no fue tan estable, por esta razón no se identifica un valor moda en este caso.
- Utilizando las pruebas y los laboratorios desarrollados por AC₄E – Aquatic Chemistry for Engineers de la universidad de Delf – Holanda se propuso una interfaz basada en Excel y el modelo hidroggeoquímico PHREEQC en conjunto con la base de datos stimela.dat desarrollada por este mismo grupo que pretende brindar una herramienta de cálculo sencilla y rápida de utilizar tanto en un entorno académico como en los diferentes laboratorios y por parte de los operadores de las plantas de potabilización.

9. RECOMENDACIONES

- Es importante destacar que para utilizar en plenitud la herramienta para el caso específico del proceso de estabilización durante la operación de la planta de potabilización, se recomienda la instalación de un punto de muestreo y un medidor en línea de pH, que envíe los datos inmediatos de muestreo al modelo para el cálculo exacto de la dosis de estabilizante.
- El modelo matemático PHREEQC, junto con la base de datos específica para procesos de tratamiento de agua stimela.dat, ofrece una gama de posibilidades interesantes para su aplicación en las plantas de potabilización, puesto que con el tiempo y recursos suficientes es posible modelar por completo cada uno de los procesos que se llevan a cabo dentro de la misma.
- Se sugiere que se realicen trabajos de grado alrededor de este tema y analizar otros procesos interesantes de mezcla de soluciones, como lo es el caso de la coagulación donde el modelo serviría para corroborar u optimizar el resultado de las pruebas de jarras y hacer de manera automática el diagrama de coagulación.
- Al utilizar el pH como parámetro de control, las gráficas de índice de saturación en función del pH pueden ser una herramienta útil para los operarios de la planta, puesto que pueden identificar el estado del índice de saturación del agua tratada debido a la experiencia mediante la medición de este parámetro.
- Se debe tener en cuenta para próximos trabajos llevar un control de calidad analítico sobre las mediciones que se realizan para validar el modelo, dado que esto influye directamente en la calidad de los datos utilizados durante la modelación, así como los resultados arrojados por la misma.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Baird, C. y Cann, M. (2014) *Química ambiental*. Segunda ed. Barcelona: Editorial Reverté.
- Barcelo, I. D., Allende, I. y E. Solis, H. (2002) "Determinación del estado de equilibrio de un sistema hídrico Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932002000200004 (Consultado: el 20 de mayo de 2021).
- Bueno Zabala, K. A., Torres Lozada, P. y Delgado Cabrera, L. G. (2014) "Monitoreo y medición del ajuste del pH del agua tratada del río cauca mediante índices de estabilización", *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), pp. 563–575. doi: 10.31910/rudca.v17.n2.2014.422.
- Casey, T. J. (2009) "Drinking water stabilisation and corrosion control drinking", *Aquavarra Research R&D Publications*. Dublin: Aquavarra Research R&D Publications.
- Colindres Mejía, L. A. (2010) *Evaluación del sistema de potabilización en la Escuela Agrícola Panamericana*. Escuela Agrícola Panamericana.
- Eyre, B. D., Andersson, A. J. y Cyronak, T. (2014) "Benthic coral reef calcium carbonate dissolution in an acidifying ocean", *Nature Climate Change*, 4(11), pp. 969–976. doi: 10.1038/nclimate2380.
- Gómez de León Higes, F. C. y Alcaraz Lorente, D. J. (2004) *Manual básico de corrosión para ingenieros*. Murcia: Universidad de Murcia. Servicio de publicaciones.
- van der Helm, A. W. C. et al. (2015) "Plant wide chemical water stability modelling with PHREEQC for drinking water treatment", *2nd IWA New Developments in IT & Water Conference, 8-10 February*, 6(2), pp. 1–5.
- Henry, G. J. y Heinke, G. W. (1999) *Ingeniería Ambiental*. Segunda. Editado por P. E. Roig Vázquez. Mexico: Pearson Educación.
- Lecomte, K. L. (2003) *Verificación y validación de modelos geoquímicos realizados con un software específico, Problemas del Conocimiento en Ingeniería y Geología*.
- Levine, I. N. (2004) *Fisicoquímica*. Quinta. Editado por C. Fernández. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A U.
- Loewenthal, R. E., Morrison, I. y Wentzel, M. C. (2004) *Control of corrosion and aggression in drinking water systems*.
- Maddison, L. A., Gagnon, G. A. y Eisnor, J. D.) "Corrosion control strategies for the Halifax regional distribution system", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(2), pp. 305–313. doi: 10.1139/I00-114.
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M. y Sillanpää, M. (2010) "Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review", *Advances in Colloid and Interface Science*, 159(2), pp. 189–197. doi: 10.1016/j.cis.2010.06.007.
- Moel, P. De, Dijk, H. Van y Meer, W. Van Der (2012) "Waterchemie voor drinkwater modeleren met PHREEQC", *H₂O*, pp. 2011–2013.
- de Moel, P., van Dijk, J. y van Der Meer, W. (2015) *Aquatic Chemistry for engineers, Starting with PHREEQC for water treatment*. Delft, Netherlands: Delft University of Technology.

Moel, P. J. De *et al.* (2013) "Assessment of calculation methods for calcium carbonate saturation in drinking water for DIN 38404-10 compliance", pp. 115–124. doi: 10.5194/dwes-6-115-2013.

NESC (1997) *¿Qué problemas causa la corrosión?* Virginia, Morgantown.

Rodriguez R. (2018) "Influencia de dos coagulantes en el proceso de estabilización química en la potabilización del agua del río cauca", Cali-Colombia: Universidad del Valle.

Parkhurst, D. y Appelo, C. A. J. (2013) "Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3—A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations". Denver, Colorado: USGS.

Schock, M. R. (2002) "Chapter 17. Internal corrosion and deposition control", en *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*. New York, pp. 17.01–17.109.

Shankar, B. (2014) "Determination of Scaling and corrosion tendencies of water through the use of Langelier and Ryznar Indices", *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 2(SJET), pp. 123–127.

Sousa, C., Correia, A. y Colmenares, M. (2010) "Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control", *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 50, pp. 187–196.

Trejo Vázquez, R. y García Díaz, L. E. (2007) "Modelacion de la Deriva del pH en Funcion del Tiempo en Muestras de Agua Potable", *Conciencia Tecnológica*, 33(Investigación), pp. 12–16.

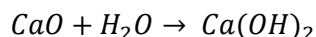
Trujillo, E., Martínez, V. y Flores, N. S. (2008) "Ajuste del Equilibrio Químico del Agua Potable con Tendencia Corrosiva por Dióxido de Carbono", 19(6), pp. 89–101. doi: 10.1612/inf.tecnol.3967it.07.

de Vargas, L. (2004) "Capítulo 3 Procesos unitarios y plantas de tratamiento", en *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría Tomo I*. Lima, pp. 100–150.

ANEXOS

ANEXO 1. Lechada de cal

Según la guía de EMCALI para la preparación y dosificación de lechada de cal, teniendo en cuenta el porcentaje de pureza mínimo aceptable de cal viva, del 90%, y la ecuación (A1.1), dada al hidratar la cal, que hace posible determinar las condiciones de la lechada para la planta puerto mallarino y río cauca.



Ecuación A1.1. Reacción de apagado de Cal

Donde:

Compuesto	Peso Molecular (kg/mol)
CaO	56
Ca(OH) ₂	74

El apagado de cal de la PTAP Río Cauca, involucra 18 bultos de 25 kg cada uno, teniendo en cuenta que el porcentaje de pureza estimado es del 90%, se obtiene un total de 405 kg de cal que reaccionan

$$405 \text{ kg CaO} / (56 \text{ kg CaO/mol}) = 7,23 \text{ mol CaO}$$

Como la reacción se da en relación 1:1, se establece la masa en kg de Ca(OH)₂ que se forma en la reacción.

$$7,23 \text{ mol CaO} * 74 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{mol} = 535,02 \text{ kg Ca(OH)}_2$$

La capacidad de la cuba es de 25 m³ dando como resultado $535,02 \text{ kg Ca(OH)}_2 / 25 \text{ m}^3 = 21,40 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 2,14\%$ de concentración.

Concentración aproximada de la lechada de cal, PTAP Río Cauca: 2,14% p/V.

Se realizó el mismo procedimiento para la planta Puerto Mallarino, teniendo en cuenta que su preparación involucra 1.500 kg CaO, donde se obtuvo una concentración teórica de 4,09%; a pesar de que valor real de la concentración de lechada de la planta Puerto es de 3,37% p/V

El apagado de cal se realizó durante tres días diferentes; para cada día de recolección de agua se preparó una lechada con anterioridad.

La cantidad de CaO en gramos a apagar dependió de la remisión de cal, tomando en cuenta el porcentaje de pureza con que llegaba, según el certificado de calidad del proveedor y su verificación por parte del laboratorio central de EMCALI. Se tomaron muestras de cal de dos lotes cada uno con una pureza diferente, estableciendo la cantidad en gramos a apagar para preparar un litro de lechada madre al 4,5%.

EMCALI recomienda un apagado en relación 3:1, es decir 3 partes de agua por una de cal, sin embargo, la relación fue 4:1 debido a que la mezcla no se daba de manera adecuada, pues el precipitado que se formaba superaba la cantidad de agua y el apagado no era exitoso, adicionalmente los operarios de turno recomendaron esa relación de apagado para garantizar una mezcla homogénea. Se realizó mezcla rápida con ayuda de un agitador magnético, durante una hora; siguiendo las instrucciones del manual de operación. En el apagado de cal se debe alcanzar una temperatura mínima de 40°C durante los primeros 3 minutos para garantizar un proceso eficiente.

Preparado 1L de lechada madre se hizo uso de la ecuación (A1.2), para determinar las cantidades exactas de agua que se deben adicionar con el fin de obtener 500 mL de las lechadas a las concentraciones deseadas, 3.5, 2.5 y 1.5 %.

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2$$

Ecuación A1.2. Dilución de una concentración

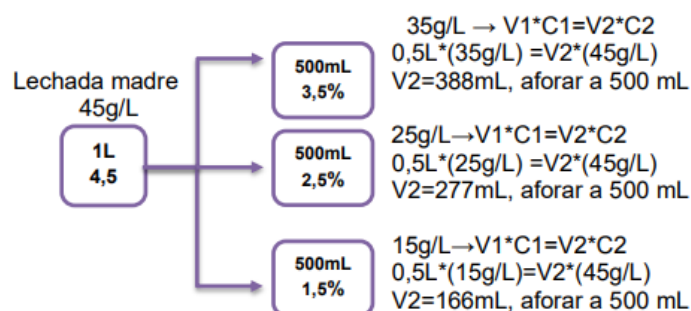
Donde:

C_1 = Concentración lechada madre (45 g/L)

V_1 = Volumen de lechada madre requerida

C_2 = Concentración deseada

V_2 = Volumen deseado (500 mL)



ANEXO 1 figura 1. Lechada de cal a diferentes concentraciones

ANEXO 2. Manual

ANEXO.2.1. Preparación del PC

Para que el modelo funcione de manera correcta, es necesaria la instalación de los módulos del modelo en el PC donde este se ejecutará, independientemente de la interfaz con la que se pretenda correr el modelo. Para esto es necesario dirigirse a la pagina oficial del modelo PHREEQC <https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3> y descargarlos de los enlaces mostrados en la figura ANEXO 2 figura 1. Cabe resaltar que dependiendo de la versión de Windows que se ejecute serán necesario uno o ambos módulos. Si el PC tiene instalada una versión de 32-bit solo se debe instalar el modulo Windows COM 32-bit; si por el contrario posee una versión de 64-bit se deberán instalar ambos módulos, tanto el de 32 como el de 64 bit.

IPhreeqc Modules

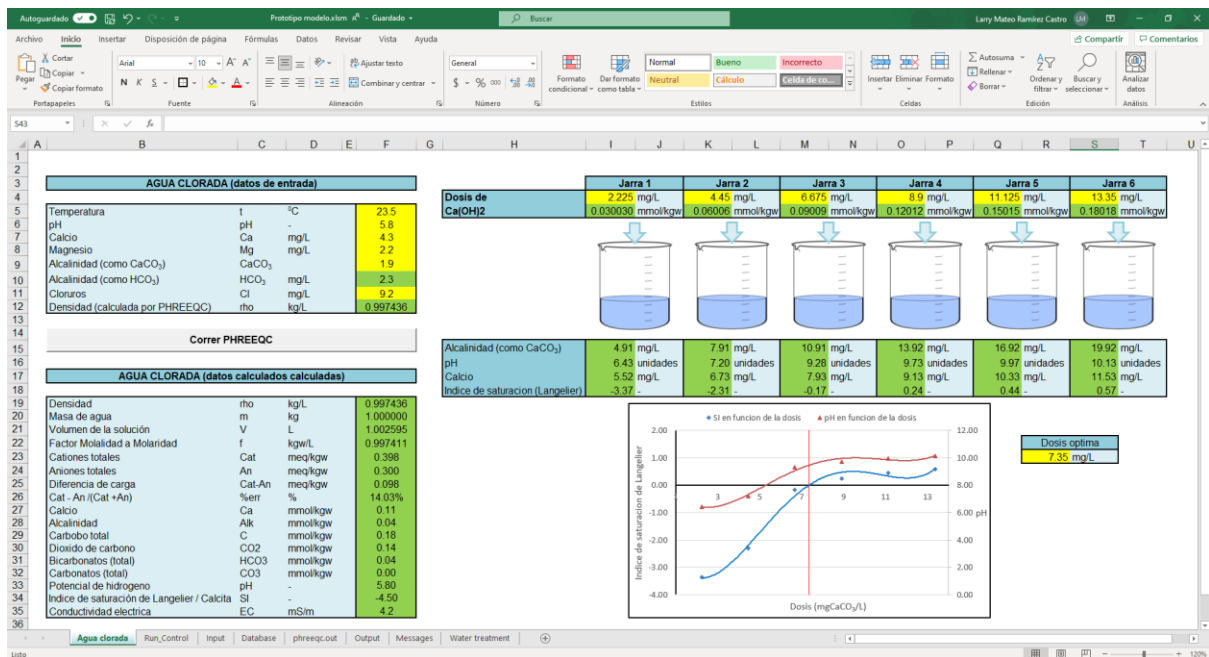
- Windows (any processor): [iphreeqc-3.7.0-15749.zip \[13M\]](#) - Source with CMake, database files, examples, and documentation
- Linux (any processor): [iphreeqc-3.7.0-15749.tar.gz \[13M\]](#) - Source with configure, database files, examples, and documentation
- Windows COM 32-bit: [IPhreeqcCOM-3.7.0-15749-win32.msi \[4M\]](#) - COM server, CHM documentation
- Windows COM 64-bit: [IPhreeqcCOM-3.7.0-15749-x64.msi \[4M\]](#) - COM server, CHM documentation (Both 32-bit and 64-bit COM versions should be installed on 64-bit versions of Windows)

ANEXO 2 figura 1. Módulos comunes de PHREEQC

Para correr el modelo conjunto con la base de datos stimela.dat y la herramienta anexa en este trabajo de grado, es necesario contar con una versión de Excel 2007 o superior y tener el Microsoft .NET Framework 3.5 instalado en el PC, en caso de no tenerlo este puede ser descargado directamente desde la página oficial de Windows <https://www.microsoft.com/es-co/download/details.aspx?id=21>. Por ultimo es necesario activar las macros en el Excel.

ANEXO.2.2. Herramienta de cálculo

Para el presente trabajo de grado se desarrollo una herramienta de cálculo de dosis optima de estabilizante para el agua entregada después del proceso de cloración, con el finde entregar un agua estable y sana para la red de distribución de agua. Para el desarrollo de esta herramienta se utilizaron varios laboratorios disponibles en la pagina del grupo holandés de la universidad de Delf – Holanda, AC₄E, modificando el código de entrada y la interfaz de su herramienta PHREEQXel hasta adaptarlos a la necesidad del presente trabajo de grado. Esto dio como resultado la interfaz presentada en la figura ANEXO 2 FIGURA 2.



ANEXO 2 figura 2. Herramienta desarrollada para el cálculo de la dosis optima de estabilizante

Como primera instancia los cuadrados pintados con el color amarillo corresponden a los datos que debemos introducir para el cálculo. Primero son necesarios los datos del agua clorada que se muestran en la figura ANEXO 2 figura 3.

AGUA CLORADA (datos de entrada)			
Temperatura	t	°C	23.5
pH	pH	-	5.8
Calcio	Ca	mg/L	4.3
Magnesio	Mg	mg/L	2.2
Alcalinidad (como CaCO ₃)	CaCO ₃	mg/L	1.9
Alcalinidad (como HCO ₃)	HCO ₃	mg/L	2.3
Cloruros	Cl	mg/L	9.2
Densidad (calculada por PHREEQC)	rho	kg/L	0.997436

ANEXO 2 figura 3. Datos de entrada del agua clorada

Una vez rellenas las casillas de color amarillo, será necesario correr el modelo dos veces seguidas, esto para que PHREEQC realice el cálculo la densidad del agua y este sea procesado de manera correcta. El modelo se correrá mediante el botón "Correr PHREEQC" mostrado en la figura ANEXO 2 figura 4.

Correr PHREEQC

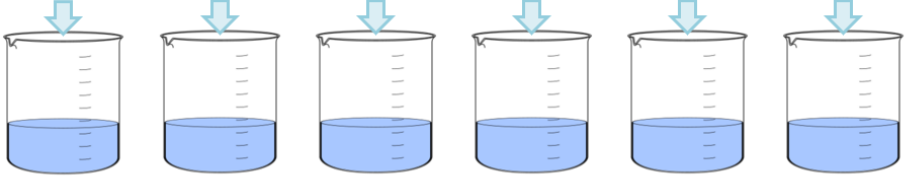
ANEXO 2 figura 4. Botón para correr la herramienta

Una vez realizado el proceso anterior, los datos calculados por el modelo para el agua clorada serán actualizados y se podrán observar en la tabla mostrada en la figura ANEXO 2 figura 5.

AGUA CLORADA (datos calculados)			
Densidad	rho	kg/L	0.997436
Masa de agua	m	kg	1.000000
Volumen de la solución	V	L	1.002595
Factor Molalidad a Molaridad	f	kgw/L	0.997411
Cationes totales	Cat	meq/kgw	0.398
Aniones totales	An	meq/kgw	0.300
Diferencia de carga	Cat-An	meq/kgw	0.098
Cat - An /(Cat +An)	%err	%	14.03%
Calcio	Ca	mmol/kgw	0.11
Alcalinidad	Alk	mmol/kgw	0.04
Carbobo total	C	mmol/kgw	0.18
Dioxido de carbono	CO2	mmol/kgw	0.14
Bicarbonatos (total)	HCO3	mmol/kgw	0.04
Carbonatos (total)	CO3	mmol/kgw	0.00
Potencial de hidrogeno	pH	-	5.80
Indice de saturación de Langelier / Calcita	SI	-	-4.50
Conductividad electrica	EC	mS/m	4.2

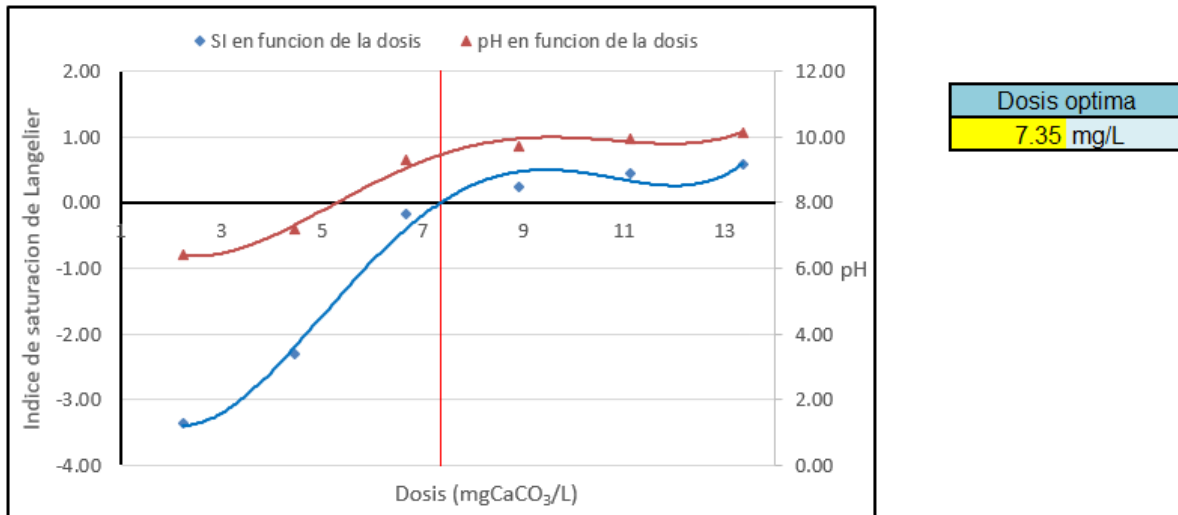
ANEXO 2 figura 5. Datos de salida para el agua clorada

Una vez terminado el proceso del agua clorada, se pueden digitar los valores deseados de dosis de estabilizante para la prueba de jarras, estos serán registrados en los cuadros amarillos mostrados en la figura ANEXO 2 figura 6.

	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
Dosis de Ca(OH)_2	2.225 mg/L 0.030030 mmol/kgw	4.45 mg/L 0.06006 mmol/kgw	6.675 mg/L 0.09009 mmol/kgw	8.9 mg/L 0.12012 mmol/kgw	11.125 mg/L 0.15015 mmol/kgw	13.35 mg/L 0.18018 mmol/kgw
						
Alcalinidad (como CaCO_3)	4.91 mg/L	7.91 mg/L	10.91 mg/L	13.92 mg/L	16.92 mg/L	19.92 mg/L
pH	6.43 unidades	7.20 unidades	9.28 unidades	9.73 unidades	9.97 unidades	10.13 unidades
Calcio	5.52 mg/L	6.73 mg/L	7.93 mg/L	9.13 mg/L	10.33 mg/L	11.53 mg/L
Indice de saturacion (Langelier)	-3.37 -	-2.31 -	-0.17 -	0.24 -	0.44 -	0.57 -

ANEXO 2 figura 6. Prueba de jarras con PHREEQXcel

Los cuadros verdes de la parte inferior de la figura ANEXO 2 figura 6 corresponden a los datos calculados por el modelo de la mezcla de un litro de agua clorada con la dosis correspondiente de estabilizante para cada una de las jarras. Estos datos generan una grafica como la que muestra en la figura ANEXO 2 figura 7 que sirve para calcular la dosis optima para ese tipo de agua clorada en concreto.



ANEXO 2 figura 7. Cálculo de la dosis optima

Final mente la dosis optima puede ser obtenida variando el valor del cuadro amarillo del lado derecho de la figura ANEXO 2 figura 7. Realizando este proceso la línea roja se moverá y deberá ser situada en el punto de corte del eje X, correspondiente a la dosis aplicada, con la línea azul, correspondiente a la línea de tendencia polinomial de grado 4 del índice de saturación de Langelier en función de la dosis aplicada.

ANEXO 3. Datos de operación plantas Río Cauca y Puerto Mallarino en el año 2016

Anexo 3 tabla 1. Frecuencia de valores de pH medidos en el agua tratada de la PTAP Puerto Mallarino durante el año 2016

Frecuencia acumulada de pH de agua tratada Planta de Puerto Mallarino			
pH	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia acumulada %
5,5	7	0,08	0,08
6	25	0,29	0,37
6,5	508	5,83	6,20
7	3856	44,28	50,48
7,5	2284	26,23	76,71
8	1032	11,85	88,56
8,5	563	6,47	95,03
9	422	4,85	99,87
9,5	11	0,13	100,00
Mayor a 9,5	0	0,00	100,00
Total datos	8708		

Anexo 3 tabla 2. Frecuencia de valores de pH medidos en el agua cruda de la PTAP Puerto Mallarino durante el año 2016

Frecuencia acumulada de pH de agua Cruda Planta de Puerto Mallarino			
pH	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia acumulada %
6	51	0,59	0,59
6,2	35	0,40	0,99
6,3	7	0,08	1,07
6,4	23	0,26	1,33
6,5	10	0,11	1,45
6,6	15	0,17	1,62
6,7	36	0,41	2,03
6,8	62	0,71	2,74
6,9	369	4,24	6,98
7	3453	39,63	46,61
7,1	3139	36,03	82,64
7,2	1424	16,35	98,99
7,3	83	0,95	99,94
7,4	2	0,02	99,97
7,5	0	0,00	99,97
7,6	1	0,01	99,98
8	2	0,02	100,00
Mayor a 8	0	0,00	100,00
Total datos	8712		

Anexo 3 tabla 3. Frecuencia de valores de pH medidos en el agua tratada de la PTAP Rio Cauca durante el año 2016

Frecuencia acumulada de pH de agua tratada Planta de Rio Cauca			
pH	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia acumulada %
5	0	0,00	0,00
5,5	0	0,00	0,00
6	0	0,00	0,00
6,5	3	0,04	0,04
7	3337	39,26	39,30
7,5	5102	60,03	99,33
8	46	0,54	99,87
8,5	9	0,11	99,98
9	2	0,02	100,00
9,5	0	0,00	100,00
Mayor a 9,5	0	0,00	100,00
Total datos	8499		

Anexo 3 tabla 4. Frecuencia de valores de pH medidos en el agua cruda de la PTAP Rio Cauca durante el año 2016

Frecuencia acumulada de pH de agua cruda Planta de Rio Cauca			
pH	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia acumulada %
6	0	0,00	0,00
6,2	0	0,00	0,00
6,3	0	0,00	0,00
6,4	0	0,00	0,00
6,5	0	0,00	0,00
6,6	0	0,00	0,00
6,7	13	0,15	0,15
6,8	33	0,39	0,54
6,9	597	7,02	7,56
7	4040	47,49	55,05
7,1	3278	38,53	93,58
7,2	535	6,29	99,87
7,3	11	0,13	100,00
7,4	0	0,00	100,00
7,5	0	0,00	100,00
7,6	0	0,00	100,00
8	0	0,00	100,00
Mayor a 8	0	0,00	100,00
Total datos	8507		