

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA EN LECHOS DE CONTACTO DE CARBONATO DE CALCIO PARA LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE AGUAS CORROSIVAS.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

DARIO ALEXANDER DE LA TORRE ORDÓÑEZ
aldto@yahoo.com

FABRICIO ALEJANDRO VACA MENA
fabriciovacam@hotmail.com

DIRECTOR: DR. ING. ANA LUCÍA BALAREZO
ana.balarezo@epn.edu.ec

QUITO, MAYO 2018

DECLARACIÓN

Nosotros, Darío Alexander de la Torre Ordóñez, Fabricio Alejandro Vaca Mena, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Darío Alexander de la Torre Ordóñez

Fabricio Alejandro Vaca Mena

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Darío Alexander de la Torre Ordóñez y Fabricio Alejandro Vaca Mena, bajo mi supervisión.

Dr.-Ing. Ana Lucia Balarezo A.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A la ingeniera Ana Lucia Balarezo por dedicar su tiempo y brindarnos su apoyo en el desarrollo de este proyecto de titulación.

A los ingenieros Patricio Toapanta y Mario Calle por su colaboración y sus conocimientos brindados que fueron indispensables para la culminación del proyecto.

A los señores miembros de la junta de agua de la cooperativa de vivienda Nueva Aurora por permitirnos utilizar el agua de su comunidad.

Darío DLT. & Fabricio V.

AGRADECIMIENTOS

A la persona más importante en mi vida, mi madre Mariela, quien sola ha dedicado su vida entera para educarme, que ha luchado arduamente día a día para que no nos falte nada sobre todo amor, por ser la persona que me ha perdonado tantas faltas y errores y que siempre ha estado pendiente para levantarme y forjarme valores para que sea una mejor persona, espero algún día ser al menos la mitad de lo que tú eres madre. Le doy gracias a Dios por haberme brindado una madre como tú y si hubiese tenido la oportunidad de elegir una madre al nacer te elegiría siempre a ti, se que me faltará la vida para recompensar todo lo que has hecho por mí, intentaré llegar a ser el hijo que te mereces.

A Joselo, por ser un hermano en mi vida y mostrarme que en la vida por mas dificultades que puedan existir hay que llevarla con alegría y afrontarla con valentía sin importar las adversidades que se presenten en ella.

A mi padre porque a pesar de todo has estado presente en mi vida.

A Eliot, porque llegaste a mi vida en el momento perfecto y me has enseñado el significado del amor incondicional, para ti siempre seré perfecto.

A mi compañero y amigo Fabricio juntos logramos sacar este proyecto adelante y sobre todo porque me has enseñado y mostrado que en la vida existen cosas que en verdad importan.

A ti, porque a pesar de todo este largo camino has estado acompañándome en este sueño, por creer en mí y porque me enseñaste a volar y soñar.

Darío DLT.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por su lucha incansable para poder darme todo lo mejor que estuvo a su alcance, por ser mi mentora y por brindarme tantas cosas en la vida, si soy algo en esta vida estoy seguro que son por tus enseñanzas madre querida, espero siempre te sientas orgullosa de mí y este logro es más tuyo que de nadie nunca podre recompensar todo tu amor tan puro y sincero.

A mi Padre por estar pendiente de mi a la distancia y por el apoyo que recibo, aunque no estés presente en mi vida diaria

A mi abuelita Anita y Segundo por cuidarme desde tan pequeño y soportarme toda la vida y a mi tía Inés por el amor tan profundo y sincero que me ha demostrado desde pequeño.

A Monserrath la persona más importante en los últimos años de mi vida, por ser la mujer que me inspira a seguir adelante con mi carrera y ser una mejor persona, te agradezco por haber llegado a mi vida.

A mi amigo, compañero de la U y espero de la vida, Darío, por ser un apoyo en la universidad y por soportarme a lo largo de toda la tesis y carrera, por fin lo logramos hermano.

A mis Amigos Carl y Daniel que siempre poder contar con ustedes

Por último, a mi Tío Cesar a pesar que nunca más nos volveremos a ver, fuiste tan importante y mi carácter te lo debo en gran parte a tus enseñanzas y tu compromiso de cuidarme como tu hijo aunque no lo sea, desearía que estés conmigo presente.

Fabricio V.M.

DEDICATORIA

A mi madre Mariela por ser el pilar fundamental de mi vida.

A mi padre José, a mi primo Joselo, a mis tías Doda, Leli y Maruja por ser las personas que han estado incondicionalmente en mi vida.

A mis amigos Jorge, Henry y Roberto porque a pesar de todo se puede y me han mostrado que la vida hay que vivirla con alegría y hay que disfrutar cada momento de ella.

También quiero dedicar este trabajo a las memorias de mi abuelo José Manuel y mi tío Darwin porque siempre fueron generosos y humildes nunca les importó lo material, se los dedico a ustedes porque siempre creyeron en mí y a pesar de que el tiempo ha pasado su recuerdo vive en mi mente cada día.

Darío DLT.O.

DEDICATORIA

A mi mami Gladys, este logro es tuyo

A mi padre, abuelitos y familia

A Monserrath

A mis tíos Cesar e Inés

A Gabriel, Steven y Micaela.

Y a todos quienes esta tesis pueda ser material de consulta.

Fabricio V. M.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
DEDICATORIA	VII
DEDICATORIA	VIII
CONTENIDO.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS	XVIII
RESUMEN	XX
ABSTRACT	XXI
PRESENTACIÓN.....	XXII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO	3
1.3 ALCANCE	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DEL AGUA	6
2.2 SISTEMA CARBONATO.....	7
2.2.1 CONDICIONES DE EQUILIBRIO DEL CO ₂ CON RESPECTO AL SISTEMA CARBONATO	8

2.2.2 SOLUBILIDAD DEL CaCO_3	9
2.3 FUENTES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS CON CARÁCTER CORROSIVO ..	9
2.3.1 ÍNDICES DE CORROSIÓN	11
2.3.2 TRATAMIENTO QUÍMICO COMO TÉCNICA DE CONTROL DE CORROSIÓN.....	15
2.4 LECHOS EMPACADOS DE CONTACTO	16
2.4.1 TIPOS DE LECHOS EMPACADOS.....	16
2.4.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL CaCO_3	18
2.4.3 CARACTERIZACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN LECHO RELLENO	18
2.5 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	22
2.7.1 CORRELACIONES PARA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	22
2.7.2 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES.....	25
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	28
3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN BASE	28
3.1.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	28
3.1.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS YACIMIENTOS DE CaCO_3	28
3.2 DETERMINACIÓN DE % DE PUREZA DE CaCO_3	29
3.3 CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL SISTEMA	29
3.3.1 VARIABLES DEL PROCESO	29
3.3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	30
3.3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MATERIAL DE EMPAQUE.....	30
3.3.4 PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA	37
3.4 ENSAYOS DE ESTABILIZACIÓN.....	40
3.4.1 ENSAYOS CON AGUA SINTÉTICA.....	40
3.4.2 ENSAYOS CON AGUA SUBTERRÁNEA.....	41
3.5 CÁLCULO DE ÍNDICES DE CORROSIÓN Y COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	42

3.5,1 ÍNDICE DE LANGELIER.....	42
3.5,2 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	42
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
4.1 RESULTADOS DEL MUESTREO PREVIO PARA LA SELECCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	43
4.2 RESULTADOS DEL % DE PUREZA DE CaCO ₃	44
4.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE D _p , POROSIDAD Y DENSIDAD	44
4.3.1 D _p	44
4.3.2 POROSIDAD Y DENSIDAD	44
4.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA SINTÉTICA.....	45
4.2 CALIDAD DEL AGUA SINTÉTICA ESTABILIZADA.....	46
4.2.1 PH.....	48
4.2.2 ALCALINIDAD	50
4.2.3 CALCIO	52
4.2.4 ÍNDICE DE SATURACIÓN DE LANGELIER	54
4.2.5 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	56
4.3 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA TRATADA.....	58
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
5,1 CONCLUSIONES	61
5,2 RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXO N°1 EJEMPLO DE CÁLCULO DEL % DE PUREZA DE LA MUESTRA COMERCIAL DE CaCO₃.....	69
ANEXO N.º 2 EJEMPLO DE CÁLCULO DE D_p, DENSIDAD Y POROSIDAD PARA CADA GRANULOMETRÍA UTILIZANDO EL MÉTODO DEL VOLUMEN DESPLAZADO	72
ANEXO N°3 AFORO VOLUMÉTRICO REALIZADO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS TASAS DE APLICACIÓN.....	76

ANEXO N°4 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN PARA CADA TASA DE APLICACIÓN Y G DE EXPERIMENTACIÓN	83
ANEXO N°5 EJEMPLO DE CÁLCULO DEL I.L.....	97
ANEXO N°6 EJEMPLO DE CÁLCULO DE K_{La}	100
ANEXO N°7 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE CONDICIONES DE EQUILIBRIO	103

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 VALORES E INTERPRETACIÓN DEL I.L.	13
TABLA 2.2 ESCALA DEL I.L. PROPUESTA POR TAVANTOUR	14
TABLA 2.3. VALORES Y CRITERIOS DE INTERPRETACION DEL IR	15
TABLA 3.1 VARIABLES DE OPERACIÓN EN EL LECHO	30
Tabla 3.2 TAMAÑO DE PARTICULAS DE MUESTRAS COMERCIALES DE CaCO ₃ , EMPRESA LA ROCA S.A.,2017.....	30
TABLA 3.3 D _p RETINIDOS DE LAS MUESTRAS COMERCIALES	34
TABLA 3.4 TIEMPO DE RETENCIÓN PARA CADA TASA DE APLICACIÓN.....	38
TABLA 3.5 PARÁMETROS QUIMICOS ANALIZADOS EN EL EFLUENTE	40
TABLA 4.1 CALIDAD DE AGUA PARA 3 MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA, SANTO DOMINGO DE LOS TSACHILAS, 2017	43
Tabla 4.2. % pureza del CaCO ₃ de las empresas la roca y discal,2017.....	44
TABLA 4.3. DIÁMETROS DE PARTICULA UTILIZADOS EN LOS LECHOS.....	44
TABLA 4.4. VALORES DE DENSIDAD Y POROSIDAD PARA CADA GRANULOMETRÍA.....	45
TABLA 4.5 CONTROL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA SINTÉTICA	45
TABLA 4.6 CONDICIONES INICIALES PROMEDIO PARA EL AGUA CRUDA ...	46
TABLA 4.7 DATOS DE pH, ALCALINIDAD, Ca ⁺² , TDS E I.L. PARA EL LECHO G2 Y TASA DE APLICACIÓN Q1	47
TABLA 4.8 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA PARA CADA GRANULOMETRÍA Y TASA DE APLICACIÓN.....	56
Tabla 4.9 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA K _{La} PARA CADA GRANULOMETRÍA Y TASA DE APLICACIÓN.....	57
TABLA 4.10 CONDICIONES DE OPERACIÓN QUE LOGRARON LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA CON AGUA SINTÉTICA.....	58
TABLA 4.11 DATOS EXPERIMENTALES PARA EL AGUA SUBTERRÁNEA COOPERATIVA NUEVA AURORA, 2017.....	59
TABLA 4.12 RESULTADOS DEL MUESTREO EN LA COOPERATIVA NUEVA AURORA.....	60

TABLA A1. 1 DATOS EXPERIMENTALES PARA DETERMINACIÓN DEL % DE PUREZA DEL CaCO_3	70
TABLA A2. 1 D_p OBTENIDOS PARA CADA GRANULOMETRÍA UTILIZANDO EL MÉTODO DEL VOLUMEN DESPLAZADO	73
TABLA A2. 2 VALORES EXPERIMENTALES PARA EL CÁLCULO DE LA POROSIDAD Y DENSIDAD	74
TABLA A3. 1 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G1	77
TABLA A3. 2 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G2	77
TABLA A3. 3 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G3	77
TABLA A3. 4 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G4	78
TABLA A3. 5 AFORO VOLUMÉTRICO G1	78
TABLA A3. 6 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G2	79
TABLA A3. 7 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G3	79
TABLA A3. 8 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G4	79
TABLA A3. 9 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G1	80
TABLA A3. 10 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G2	80
TABLA A3. 11 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G3	80
TABLA A3. 12 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G4	81
TABLA A3. 13 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G1	81
TABLA A3. 14 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G2	81
TABLA A3. 15 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G3	82
TABLA A3. 16 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G 4	82
TABLA A4. 1 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G1 Y Q1	84
TABLA A4. 2 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G2 Y Q1	85
TABLA A4. 3 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G3 Y Q1	86
TABLA A4. 4 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G4 Y Q1	87
TABLA A4. 5 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G1 Y Q2	88
TABLA A4. 6 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G2 Y Q2	89
TABLA A4. 7 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G3 Y Q2	90

TABLA A4. 8 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G4 Y Q2	91
TABLA A4. 9 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G2 Y Q3	92
TABLA A4. 10 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G3 Y Q3	93
TABLA A4. 11 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G4 Y Q3	94
TABLA A4. 12 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G3 Y Q4	95
TABLA A4. 13 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS PARA G4 Y Q4	96

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES DEL SISTEMA CARBONATO EN FUNCIÓN DEL pH.....	8
FIGURA 2.2 USO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ECUADOR, 2016	10
FIGURA 2.3 RIQUEZA DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO DE LA DEMARCACIÓN DE ESMERALDAS, 2016	11
FIGURA 2.4 COLUMNA CON LECHO FIJO.....	17
FIGURA 2.5 COLUMNA CON LECHO FLUIDIZADO	18
FIGURA 2.6 ESFERICIDAD DE PARTICULAS	19
FIGURA 2.7 GRÁFICA PARA EL CÁLCULO DE N_{oL}	26
FIGURA 3.1 SISTEMA UTILIZADO EN EL TRABAJO EXPERIMENTAL.....	31
FIGURA 3.2 CUARTEO DE MUESTRA DE MÁRMOL	32
FIGURA 3.3 COLOCACIÓN DE LA MUESTRA SOBRE LOS TAMICES.	32
FIGURA 3.4 TAMIZADO DE LA MUESTRA	33
FIGURA 3.5 MATERIAL RECOGIDO SOBRE CADA TAMIZ	33
FIGURA 3.6 LAVADO Y SECADO DEL MÁRMOL	34
FIGURA 3.7 GRANOS DEL MATERIAL COLOCADOS EN LAS PROBETAS	35
FIGURA 3.8 MATERIAL PESADO.....	36
FIGURA 3.9 AGUA COLOCADA PARA DESALOJAR EL AIRE EN EL LECHO ..	36
FIGURA 3.10 PURGA DE LLAVES PREVIO A EXPERIMENTACIÓN	37
FIGURA 3.11 PÉRDIDA DE CARGA DEL LECHO CON G1 LUEGO DE 2 MIN A FLUJO CONTINUO.....	39
FIGURA 3.12 COLOCACIÓN DE TANDAS DE MÁRMOL PARA CADA EXPERIMENTACIÓN.....	39
FIGURA 3.13 FACTORES DE CONDUCTIVIDAD DE LOS IONES COMÚNMENTE ENCONTRADOS EN EL AGUA.....	41
FIGURA 3.14 TOMA DE MUESTRAS A LA SALIDA DEL LECHO.....	41
FIGURA 4.1 VARIACIÓN DE pH PARA CADA TASA DE APLICACIÓN.....	49
FIGURA 4.2 VARIACIÓN DE ALCALINIDAD PARA CADA TASA DE APLICACIÓN.....	51
FIGURA 4.3 VARIACIÓN DE Ca^{+2} PARA CADA TASA DE APLICACIÓN	53
FIGURA 4.4 VARIACIÓN DE I.L. PARA CADA TASA DE APLICACIÓN.....	55

FIGURA 4.5 EFICIENCIA DE OPERACIÓN EN TÉRMINOS DE
TRANSFERENCIA DE MASA.....58

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

pH	potencial de hidrogeno
CO ₂	dióxido de carbono
SENAGUA	Secretaria Nacional del Agua
INAHMI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censo
AWWA	American Works Water Association
H ₃ O ⁺	ion hidronio
HCO ₃ ⁻	ion bicarbonato
CO ₃ ⁻²	ion carbonato
Ca ⁺²	calcio
H ⁺	ion hidronio
OH ⁻	ion hidroxilo
CaCO ₃	carbonato de calcio
Mg ⁺²	magnesio
Cu ^o	cobre
Fe ^o	hierro
SO ₄ ⁻²	ion sulfato
Cl ⁻	ion cloruro
HNO ₃	ácido nítrico
I.L.	Índice de Langelier
I.R.	Índice de Ryznar
Dp	diámetro de partícula
pK _{a2}	constante de ionización
pK _{so}	constante de solubilidad
μ	esfuerzo iónico
pK _{a2c}	constante de ionización corregida por el esfuerzo iónico
pK _{soc}	constante de solubilidad corregida por el esfuerzo iónico
TDS	Sólidos Disueltos Totales
K _L	coeficiente de transferencia de masa global en la fase líquida
K _L a	coeficiente volumétrico de transferencia de masa
K _c	coeficiente de transferencia de masa

J_A	flujo difusivo de A en la superficie entre el sistema y el entorno
$C:$	concentración
D_{AB}	difusividad del componente A hacia componente B
J_A	flujo del componente A
Sh	número de Sherwood
δ	espesor de la película
Re	número de Reynolds
Sc	número de Schimidt
Z	altura del lecho empacado
H_{OL}	altura de la unidad de transferencia
N_{OL}	número de unidades de transferencia para la fase líquida

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como finalidad determinar el coeficiente de transferencia de masa para la estabilización química de aguas corrosivas, utilizando lechos empacados de CaCO_3 .

Se inició con la construcción de 4 lechos, con tubos de vinilo transparente, de 1 m de alto, 3.175 cm de diámetro del lecho y 40 cm de altura de relleno, parámetros recomendados por Castro (1992). Seguidamente, se seleccionó el material de empaque del lecho, a partir de muestras comerciales de CaCO_3 de las empresas LA ROCA S.A. y DISCAL, determinando una pureza del 95,56% de CaCO_3 . Posteriormente, se tamizó el material en 4 diferentes granulometrías, para ser colocadas en los lechos, cada una fue caracterizada por diámetro de partícula, porosidad, densidad y área interfacial.

La experimentación se realizó en dos etapas, primero utilizando agua sintética con $\text{IL} < -0.5$ y posteriormente con agua subterránea del pozo de la Cooperativa Nueva Aurora, Santo Domingo de los Tsáchilas. El agua corrosiva fue alimentada a los lechos, a 4 diferentes tasas de aplicación hidráulica, por un periodo de 7 horas; el control de la estabilización química se realizó cada 30 min determinando en el efluente el pH, alcalinidad, calcio, temperatura, y conductividad eléctrica.

Finalmente, la estabilización química, $\text{I.L.} = 0.13$, se consiguió con una tasa de aplicación de 0.094 l/min, granulometría de 1.19 mm, tiempo de experimentación de 6 horas, y un coeficiente de transferencia de masa K_L de 0.879 $\text{kg/m}^2 \text{ h}$.

La estabilización con el agua subterránea no fue alcanzada debido a la alta concentración de hierro que interfiere en el proceso, por lo que se recomienda la aplicación de lechos empacados al final del proceso de potabilización.

ABSTRACT

The objective of this work was to determine the mass transfer coefficient for the chemical stabilization of corrosive waters, using packed beds of CaCO_3 .

It began with the construction of 4 beds, with transparent vinyl tubes, 1m high, 3.175 cm of bed diameter and 40 cm of fill height, based on the parameters recommended by Castro (1992). Then, the packing material of the bed was selected, from commercial samples of CaCO_3 from the companies LA ROCA S.A. and DISCAL, determining a purity of 95,56% of CaCO_3 . Subsequently, the material was sieved in 4 different granulometries, to be placed in the beds, each one characterized by particle diameter, porosity, density and interfacial area.

The experimentation was carried out in two stages, first using synthetic water with I.L. <0.5 and subsequently with groundwater from the well of the Cooperativa Nueva Aurora, Santo Domingo de los Tsáchilas. The corrosive water was fed to the beds, at 4 different rates of hydraulic application, for a period of 7 hours; the chemical stabilization control was carried out every 30 min, determining the pH, alkalinity, calcium, temperature, and electrical conductivity in the effluent.

Finally, the chemical stabilization, I.L. = 0.13, was achieved with an application rate of 0.094 L / min, granulometry of 1.19 mm, experimentation time of 6 hours, and a mass transfer coefficient of K_L of 0.870 $\text{kg/m}^2\cdot\text{h}$

Stabilization with groundwater was not achieved due to the high concentration of iron that interferes with the process, so the application of packed beds at the end of the purification process is recommended.

PRESENTACIÓN

El siguiente trabajo de experimentación está desarrollado en cinco capítulos los mismos que se presentan a continuación.

En el capítulo uno se presentan los aspectos generales del estudio, los antecedentes, objetivos, justificación y alcance.

El capítulo dos detalla el marco teórico de la estabilización química del agua orientada al equilibrio del sistema carbonatos en el agua, se indica brevemente los índices que permitan caracterizar aguas corrosivas. Además, se desarrollan algunas técnicas de control de aguas corrosivas, haciendo énfasis en el estudio de lechos empacados, finalmente, se presenta la estimación del coeficiente de transferencia de masa y utilidad.

El capítulo tres describe la metodología aplicada en el trabajo experimental orientada a cumplir los objetivos específicos planteados en el proyecto.

El capítulo cuatro presenta los resultados obtenidos y la discusión de los datos de experimentación con agua sintética, además se presentan los resultados experimentales obtenidos con el agua subterránea y se analiza la incidencia de la presencia del hierro en la estabilización.

El capítulo cinco presenta las conclusiones y recomendaciones de la investigación desarrollada.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Este trabajo investigativo está enmarcado al estudio de la corrosión, el cual es un fenómeno químico o electroquímico cuya ocurrencia es favorecida por una condición química de subsaturación respecto al carbonato de calcio, que se origina cuando el agua contiene una combinación no adecuada de valores de pH, alcalinidad y calcio (Trujillo, Martínez, & Flores, 2008).

En el Ecuador la cantidad de agua de abastecimiento no siempre es suficiente sobre todo en algunas zonas en las cuales existe una marcada diferencia entre la época lluviosa y la época seca, como es el caso de Manabí, Santa Elena, sur de Esmeraldas y los valles interandinos (Campos, Sinichenko, & Gritsuk, 2014).

En lo que respecta a los recursos subterráneos, la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA) indica que son poco conocidos, ya que la información disponible es limitada y se requiere realizar importantes investigaciones para desarrollar una base de datos confiable. Sin embargo, se puede decir que en la mayor parte del Ecuador existe agua subterránea dulce disponible, indicándose que en los valles del Callejón Interandino los acuíferos son pequeños, mientras que los más abundantes se localizan en la cuenca del río Guayas y en las formaciones aluviales del Oriente (Burbano, Becerra, & Pasquel, 2015; INAMHI, 2014). Además, en el Ecuador según datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, un 23,49% de ecuatorianos no tienen acceso al agua potable (INEC, 2013).

Existen zonas en las que el agua subterránea es el único recurso accesible para abastecer poblaciones o para el riego de cultivos, la cual es esencial para la seguridad alimentaria y de carácter vital para el funcionamiento de los ecosistemas (CEPAL, 2011). Uno de los inconvenientes de usar estas fuentes es la alta corrosividad que pueden contener. Además, Mora Arellano & Cedeño, (2006) mencionan que la corrosión en los materiales metálicos, producen perforaciones y obstrucciones de las

líneas de agua, a su vez las estructuras de concreto son susceptibles de sufrir agresiones por mecanismos fisicoquímicos y biológicos donde la corrosión es el elemento de ataque destructivo.

Además, en la investigación de American Work Water Association AWWA (2002) y De Sousa, Correia, & Colmenares (2010), se identificó que los productos de la corrosión y la acumulación de sedimentos en los sistemas de distribución pueden proteger a los microorganismos de los desinfectantes, los cuales pueden reproducirse y causar problemas tales como mal sabor y olor, lo que trae como consecuencia que el agua que llega al consumidor no sea apta para su consumo.

En este contexto, esta investigación analiza la utilización de los lechos de contacto de piedra caliza, en los cuales la disolución del CaCO_3 altera las características químicas del agua de tal manera que esta se acerque a la estabilización química con respecto al CaCO_3 y disminuya su carácter corrosivo. Además, en el Ecuador es necesario incentivar el uso de lechos de CaCO_3 en pequeñas plantas de tratamiento como una alternativa a las metodologías convencionales de tratamiento de corrosión de tal manera que se pueda aprovechar las fuentes de piedra caliza como recurso minero no renovable en varias localidades del país.

Es por esto que esta investigación presenta una alternativa al tratamiento de las aguas con carácter corrosivo, lo cual puede causar problemas que afectan a la infraestructura hidráulica de extracción y distribución de agua para uso y consumo humano puede presentar disminución del desempeño hidráulico y por lo tanto aumento de los costos de distribución y de mantenimiento de la red (Trujillo et al., 2008).

Por lo tanto, esto aportaría a la utilización del recurso hídrico subterráneo del país debido a que es poco explotado y además esta investigación permite optar por una alternativa más simple y menos costosa que permitiría poder abastecer de agua a poblaciones especialmente rurales cuya única fuente de abastecimiento sea aguas subterráneas que estén desestabilizadas químicamente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el coeficiente de transferencia de masa del CaCO_3 , mediante la experimentación en lechos de contacto, para la estabilización química de aguas corrosivas.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Determinar las características fisicoquímicas de la piedra caliza mediante el método APHA 3500, para la construcción de 4 reactores de CaCO_3 a diferentes granulometrías.
- Preparar un agua estandarizada corrosiva con una solución 0.5 M HCl o HNO_3 para la estabilización de los reactores previo a la experimentación.
- Calcular el índice de Langelier, con los datos obtenidos en la experimentación de los reactores, para verificar su eficiencia de neutralización.
- Calcular el coeficiente de transferencia de masa del CaCO_3 , mediante el flujo continuo del agua corrosiva a través de los lechos de contacto, para determinar qué granulometría permite una mayor eficiencia de estabilización química del agua en el tiempo esperado de experimentación.

1.3 ALCANCE

La presente investigación estudió el proceso de estabilización química de aguas corrosivas a través de lechos empacados con CaCO_3 ; para el efecto se experimentó con 4 diámetros de partícula del material de empaque y se ensayaron 4 tasas de aplicación hidráulica, para determinar las condiciones de operación óptimas de estabilización según la recomendación sugerida por Castro (1992), esto es estudiar la influencia del diámetro de partícula y la tasa de aplicación en la estabilización química de aguas corrosivas. Se tomó como referencia el diámetro de columna y altura del lecho y se varió los diámetros de partícula y tasas de aplicación.

Tomando en cuenta que el tiempo de retención es diferente ya que se mantiene el diámetro de columna, pero se varía el diámetro de partícula y la tasa de aplicación

hidráulica, el presente trabajo realizó una experimentación de 7 horas para cada condición de operación.

Dentro del alcance no se estudia la cinética de la reacción de la piedra caliza a lo largo del lecho empacado, ya que se encuentra estudiada y detallada por Gude (2010), Letterman (2001) y Sallanko, Hietala, Lindström, Kytövaara, & Väisänen (2013).

1.4 JUSTIFICACIÓN

El agua con valores de pH ácidos, es capaz de disolver los materiales en las tuberías de suministro de agua potable, siendo así que el ajuste del pH es el método más utilizado para la disminución del carácter corrosivo, ya que permite aumentar la presencia de iones hidroxilo OH^- , este ajuste se logra a través de la adición de CaCO_3 el cual si se encuentra en equilibrio, es capaz de generar una capa protectora sobre la superficie de los materiales disminuyendo así la corrosión (De Sousa et al., 2010).

La presente investigación propone utilizar los lechos de contacto de piedra caliza, en los cuales la disolución del CaCO_3 altera las características químicas del agua de tal manera que esta agua se estabilice químicamente y disminuya su carácter corrosivo.

La metodología a emplazarse ha sido utilizada tanto en investigaciones experimentales como en plantas de tratamiento reales, Letterman (2001), concluyó que las capas de piedra caliza pueden mitigar la corrosión permitiendo aumentar el pH, calcio y alcalinidad causantes de la corrosión. La American Society for Testing and Materials (ASTM), indica la utilidad de los filtros de calcita o piedra caliza triturada para la neutralización del dióxido de carbono en aguas corrosivas, finalmente concluyen que la estabilización química se alcanza mediante la disolución del CaCO_3 , y el consecuente incremento de pH y la alcalinidad del agua hasta valores convenientes. En la presente investigación se obtuvieron datos que podrían contribuir a futuras investigaciones en el campo de diseño de reactores, para ser utilizados en pequeños sistemas de abastecimiento de agua potable.

En el Ecuador existen pequeñas comunidades que se abastecen únicamente de agua subterránea, por lo general presentan características corrosivas (CEPAL, 2011). Esta investigación pretende plantear una alternativa tecnológica para el control de la corrosión, que sea de fácil acceso, implementación, operación y mantenimiento, debido a que la piedra caliza es un recurso minero de bajo costo y abundante disponibilidad en el Ecuador (CEPAL, 2011).

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DEL AGUA

El proceso de estabilización química se utiliza con la finalidad de dar un acondicionamiento químico al agua para disminuir la tendencia corrosiva o garantizar que no se formen incrustaciones (Bueno Zabala, 2014). Una agua estabilizada químicamente es aquella que no disuelve la película de CaCO_3 que protege las tuberías metálicas contra la corrosión y tampoco precipita CaCO_3 que pueda obstruirlas (Snoeyink, Jenkins, & Sanginés Franchini, 1987; Trujillo et al., 2008).

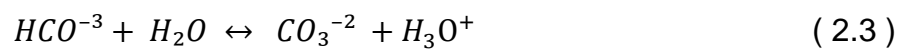
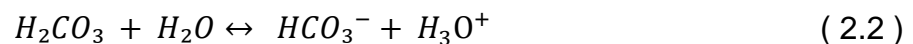
El comportamiento del pH del agua en los sistemas de distribución de agua se ve influenciado por la adición de productos químicos requeridos en los procesos de potabilización y por variaciones de las concentraciones de alcalinidad, afectando directamente la calidad del agua potable y en consecuencia incrementando los costos en el mantenimiento de la red, provocando agresividad, corrosión o incrustaciones en la tubería que traen problemas de lixiviación de metales, formación de biopelículas y reducción del diámetro de la red; es por esto que se requiere como última etapa en el proceso de potabilización a la estabilización química del agua previo a su distribución al sistema de abastecimiento, ofreciendo condiciones que otorguen un impacto mínimo a la red y a su vez alarguen su tiempo de vida útil asegurando la calidad del agua en el sistema de distribución hasta llegar al usuario final (Bueno Zabala, 2014; Trujillo et al., 2008).

El control de la corrosión e incrustación en los sistemas de distribución se puede realizar diseñando y seleccionando apropiadamente los materiales que conformen el sistema de distribución, utilizando esmaltes, pinturas, epoxi y alquitrán como revestimientos de la tubería o aplicación de alcalinizantes o bases que modifican la calidad del agua; estos métodos representan costos elevados de implementación por lo que la estabilización química del agua desde la planta de tratamiento es el más económico y común debido a su relativa simplicidad en la implementación (De Sousa et al., 2010; Trujillo et al., 2008).

Las condiciones químicas que presenta un agua en relación con el estado de subsaturación o sobresaturación respecto al CaCO_3 son causantes de la corrosividad o incrustación y sus efectos (Casey, 2009).

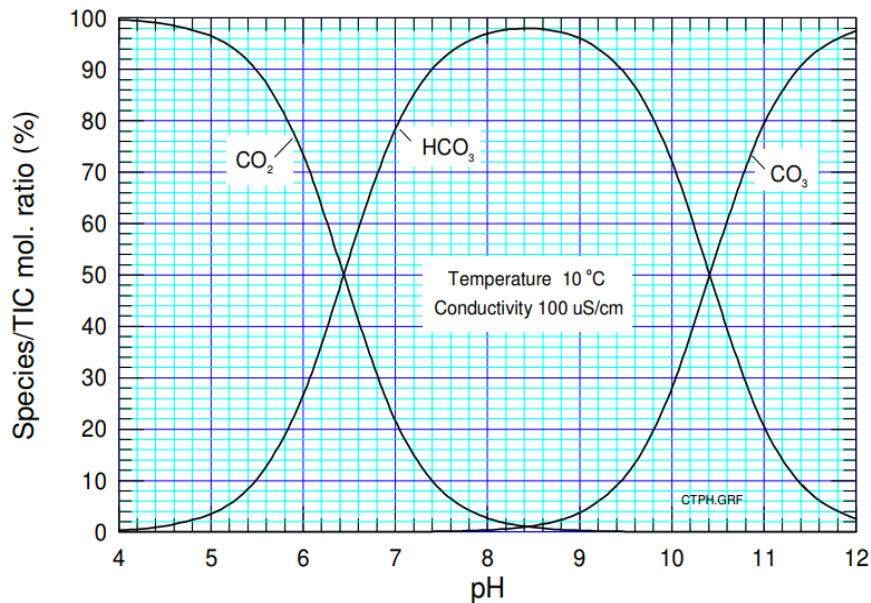
2.2 SISTEMA CARBONATO

Según Castro (1992), Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua (2003) y Bueno Zabala (2014), las especies que forman el Carbón Inorgánico Total (CIT) en el agua o también conocido como sistema carbonatos son el CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- y CO_3^{2-} . EL pH del agua y el CIT, se relacionan directamente con las concentraciones de HCO_3^- y CO_3^{2-} , por medio de la disociación del H_2CO_3 en el agua, tal como se muestra en las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3.



La distribución de las especies presentes del sistema carbonato en función del pH se muestra en la Figura 2.1, e indica que a medida que se incrementa el pH del agua, el CO_2 se convierte en HCO_3^- y a medida que el pH aumenta hacia un valor cercano a 8,5, el CO_2 presenta concentraciones que ya no pueden ser medibles y en ese punto el HCO_3^- se convierte en CO_3^{2-} (Bueno Zabala, 2014; Casey, 2009). Finalmente, Branán (2011), concluye que la fuente principal de la alcalinidad en aguas naturales es el HCO_3^- .

FIGURA 2.1 DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES DEL SISTEMA CARBONATO EN FUNCIÓN DEL pH



Fuente: (Casey, 2009)

2.2.1 CONDICIONES DE EQUILIBRIO DEL CO₂ CON RESPECTO AL SISTEMA CARBONATO

El equilibrio del sistema carbonatos en aguas subterráneas depende del CO₂ presente en el agua, la ecuación 2.4 muestra que el comportamiento del CaCO₃ contenido en las aguas naturales puede verse influenciado por la presencia de diferentes cantidades de CO₂ libre, por lo tanto el CO₂ debe permanecer en equilibrio para evitar cambios en el sistema (Bueno Zabala, 2014). Según la Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua (2003) y Sallanko, Hietala, Lindström, Kytövaara, & Väisänen (2013) el CO₂ en equilibrio es la cantidad de CO₂ que debe estar presente en el agua para mantener en solución al bicarbonato.



En presencia de cantidades de CO₂ en exceso, éste disuelve el CaCO₃ para incrementar la concentración de HCO₃⁻, manteniéndola en solución y conservando al CO₂ en equilibrio, por otro lado, si existe déficit de CO₂, el CaCO₃ precipita para

disminuir la concentración de HCO_3^- y en consecuencia incrementar el CO_2 para de esta manera restablecer el equilibrio (Bueno Zabala, 2014; Sallanko et al., 2013) .

Por lo tanto el agua se considera agresiva cuando existe la condición de exceso de CO_2 , por otro lado si la presencia de CO_2 libre es igual a la de CO_2 de equilibrio el agua presenta la condición de estabilización y si existe déficit en el CO_2 de equilibrio, se dice que el agua es incrustante (Bueno Zabala, 2014; Sallanko et al., 2013).

2.2.2 SOLUBILIDAD DEL CaCO_3

La ecuación 2.5 muestra la reacción de disolución del CaCO_3 (s) en agua, el cual es un material ligeramente soluble.



Según Letterman (2001) y Merrill & Sanks (1977), para que el CaCO_3 precipite es necesario que el producto de las concentraciones de los iones Ca^{+2} y CO_3^{2-} sea mayor al valor de la constante del producto de solubilidad del CaCO_3 (s), el agua que cumple esta condición es conocida como sobresaturada respecto al CaCO_3 y si por el contrario es menor, la condición es de subsaturación, en este último caso, para llegar al estado de estabilización será necesario agregar más CaCO_3 al agua.

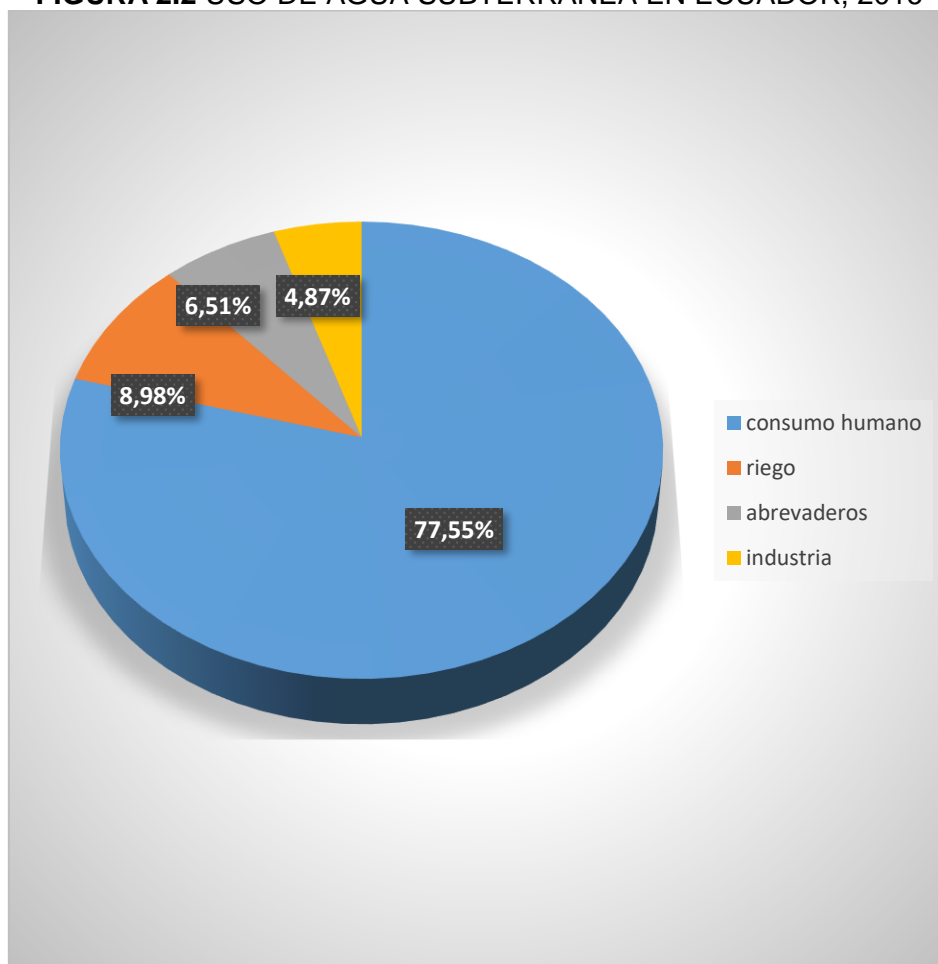
2.3 FUENTES DE AGUAS SUBTERRANEAS CON CARÁCTER CORROSIVO

En el Ecuador la información respecto al agua subterránea es limitada, sin embargo la CEPAL (2011), menciona que la mayor cantidad aprovechable se encuentra en la cuenca del río Guayas y en la amazonia, mientras que en los valles interandinos, los acuíferos son de menor tamaño.

El proyecto Arcal CXXXV de la International Atomic Energy Agency (2016), indica que un estudio realizado por la SENAGUA en el Ecuador, analizó el uso de 6916 pozos de agua, determinando que el 77.55% es para consumo humano y en menor

porcentaje para otros usos como riego, industria y abrevaderos. La Figura 2.2 muestra la distribución de uso del agua subterránea en Ecuador para el año 2016.

FIGURA 2.2 USO DE AGUA SUBTERRANEA EN ECUADOR, 2016



Fuente: (IAEA, 2016)

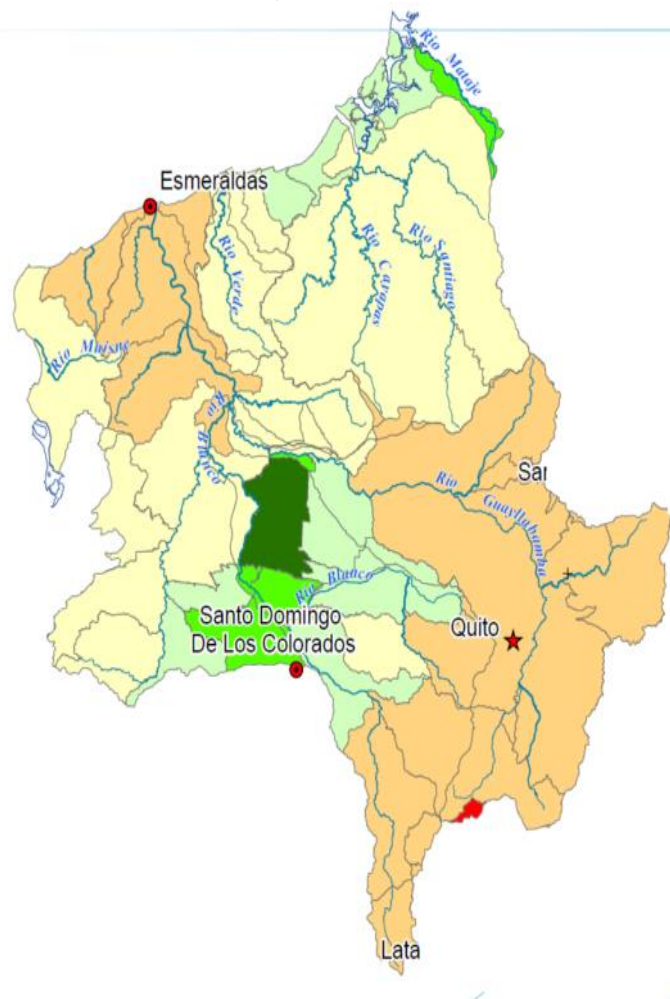
Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

Además la Figura 2.3, indica que en Ecuador, la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, ubicada en la demarcación de Esmeraldas, presenta la zona más rica en recursos hídricos subterráneos explotables (IAEA, 2016).

FIGURA 2.3 RIQUEZA DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO DE LA DEMARCACIÓN DE ESMERALDAS, 2016

Demarcación Esmeraldas

Módulos de recursos de aguas subterráneas explotables (10 ⁴ m ³ /km ² .a)		
	< 5	Zona pobre en recursos explotables
	5-15	
	15-30	Área de recursos explotables relativamente rica
	30-45	
	45-55	Zona rica en recursos
	>55	



Fuente: *Mapa Geológico de la República del Ecuador (1993)*
Mapa Hidrogeológico Nacional de la República del Ecuador (1993)
Plan Nacional de Recursos Hidráulicos de la República del Ecuador (1989)
 Elaborado por: CISPDR, 2013.

Fuente: **(IAEA, 2016)**

2.3.1 ÍNDICES DE CORROSIÓN

Los índices de corrosión han sido diseñados para relacionar las interacciones entre las variables químicas del agua y los materiales expuestos en ella; oxígeno disuelto, pH, alcalinidad, calcio, sólidos suspendidos, materia orgánica, iones metálicos que pueden reducirse en reacciones catódicas, concentración total de sales, aniones específicos (tales como Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^-), los factores biológicos y la temperatura han demostrado tener un efecto directo sobre la corrosión (Letterman, 2001)

Según Letterman (2001) y Sousa et al. (2008) dentro de estos índices se tiene el de saturación de Langelier (I.L), el Potencial de Precipitación de Carbonato de Calcio

(PPC), que determinan la estabilidad del agua y la formación de una capa protectora sobre las superficies metálicas de las tuberías. Trujillo et al. (2008), señala la existencia de otros índices tales como el Índice de estabilidad de Ryznar (I.R), el de corrosión de Larson, que miden el potencial corrosivo del agua.

2.3.1.1 ÍNDICE DE SATURACION DE LANGELIER (I.L.)

Determina el estado de saturación respecto al CaCO_3 , se basa en el efecto que ejerce el pH en la solubilidad del CaCO_3 ; este índice permite determinar cualitativamente si un agua es agresiva o incrustante; según De Sousa et al.(2010); Letterman (2001); Loewenthal, Morrison, & Wentzel, 2004 y Trujillo et al. (2008), la información necesaria para calcular el I.L. es la siguiente:

1. Alcalinidad (mg CaCO_3 /l)
2. Concentración de calcio (mg Ca/l)
3. Fuerza iónica
4. pH
5. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

La fuerza iónica puede estimarse a partir de los sólidos disueltos totales o de la medición de la conductividad específica y un factor de conversión.

El I.L. se define como la diferencia existente entre el pH real o medido del agua y el pH hipotético si el agua estuviera en equilibrio con CaCO_3 denominado pH de saturación (Casey, 2009; Letterman, 2001; Snoeyink et al., 1987).

$$\text{I.L.} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad (2.6)$$

Donde:

pH = pH real del agua

pH_s = pH del agua si estuviera en equilibrio con respecto al CaCO_3 .

El pH_s se determina con la ecuación 2.7 y se encuentra en función de los sólidos disueltos totales, concentraciones de calcio y alcalinidad, expresadas como CaCO_3 .

$$\text{pH}_s = \text{p}k_{a_{2c}} - \text{p}k_{s_{o_c}} + (-\log(\text{Ca}^{2+}/40000)) + (-\log(\text{Alc}/50000)) \quad (2.7)$$

Donde:

pk_{a2c} : constante de ionización corregida por el esfuerzo iónico

pk_{so_c} : constante de solubilidad corregida por el esfuerzo iónico

Los valores de pk_{a2c} y pk_{so_c} pueden ser corregidos con las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10.

$$pk_{a2c} = pka_2 - \frac{2 * u^{0,5}}{1 + 1,4u^{0,5}} \quad (2.8)$$

$$pk_{so_c} = pks_o - \frac{4u^{0,5}}{1 + 3,9u^{0,5}} \quad (2.9)$$

$$u = 2,5 * 10^{-5} * TDS \quad (2.10)$$

Donde:

u: esfuerzo iónico (mg/l)

pk_{a2} : constante de ionización

pk_{so} : constante de solubilidad

TDS: Sólidos Disueltos Totales (mg/l)

Según Snoeyink et al. (1987) y Tavanpour, Noshadi, & Tavanpour (2016), las concentraciones de HCO_3^- en aguas naturales son equivalentes a la alcalinidad total debido a que en los rangos de pH=6 a 8, predomina HCO_3^- . La interpretación del Índice de Langelier se muestra en la Tabla 2.1

TABLA 2.1 VALORES E INTERPRETACIÓN DEL I.L.

Valor IL	Interpretación
I.L. > 0	El agua está sobresaturada, el $CaCO_3$ se deposita, por lo tanto, el agua es incrustante.
I.L. = 0	El agua está saturada (en equilibrio) con $CaCO_3$, éste ni se precipita ni se disuelve.
I.L. < 0	El agua está subsaturada el $CaCO_3$ tiende a disolverse por lo tanto el agua es agresiva o corrosiva.

Fuente. De Sousa et al. (2010)

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

Adicionalmente, Tavanpour et al. (2016), proponen una escala más estrecha del I.L. presentada en la Tabla 2.2.

TABLA 2.2 ESCALA DEL I.L. PROPUESTA POR TAVANTOUR

Valor I.L.	Interpretación
<-5	Corrosión severa
-2 a -4	Corrosión leve
-0.5 a -1	Corrosión baja
0	En equilibrio
0.5	Bajo nivel de formación de incrustaciones
1 a 2	Formación moderada de incrustaciones
3	Formación media de incrustaciones
4	Formación severa de incrustaciones

Fuente. Tavanpour et al. (2016)

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

Finalmente según Tavanpour et al. (2016), Bueno Zabala (2014), De Sousa et al. (2010), Trujillo et al. (2008), Loewenthal et al. (2004) y Letterman (2001), el I.L. debe tener un valor entre -0,5 y +0,5 para garantizar la formación de una película protectora de CaCO₃ sobre la red de distribución.

2.3.1.2 ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE RYZNAR (IR)

Es un índice empírico cualitativo que permite determinar el carácter corrosivo o incrustante del agua, también considera el pH de saturación (Novillo & Quezada, 2017; De Sousa et al., 2010). La ecuación 2.11 permite determinar este Índice:

$$IR = 2 \text{ pHs} - \text{pH} \quad (2.11)$$

Donde:

pH = pH real del agua (medido)

pHs = pH de saturación

Trujillo et al. (2008), menciona los criterios de interpretación para el IR y se presentan en la Tabla 2.3.

TABLA 2.3. VALORES Y CRITERIOS DE INTERPRETACION DEL IR

Valor IR	Interpretación
$4 \leq IR < 5$	agua fuertemente incrustante
$5 \leq IR < 6$	agua moderadamente incrustante
$6 \leq IR < 7$	agua poco incrustante o corrosiva
$7 \leq IR < 7.5$	agua corrosiva
$7.5 \leq IR < 9$	agua fuertemente corrosiva
$IR \geq 9$	agua muy corrosiva

Fuente: Trujillo et al. (2008)

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

A diferencia del I.L. y otros índices, el IR no tiene ningún fundamento teórico. Al multiplicar el valor del pH por 2, el índice tiende a favorecer las aguas de mayor dureza y alcalinidad que naturalmente tendrían un mayor potencial para depositar CaCO_3 si su pH excede valores de pHs (Letterman, 2001; Trujillo et al., 2008).

2.3.2 TRATAMIENTO QUÍMICO COMO TÉCNICA DE CONTROL DE CORROSIÓN

Esta técnica controla el: pH, alcalinidad y oxígeno, evitando así la afectación a las tuberías y accesorios por corrosión.

- **Ajustes del pH**

Las aguas subterráneas al tener una concentración elevada de H^+ por lo general tienen características corrosivas ya que son receptores de electrones dando paso a diferentes reacciones de corrosión; es por esto que el ajuste del pH es el método más utilizado para el control de la corrosión en las redes de distribución de agua potable; elevar el pH a través de diferentes alcalinizantes permite que las aguas se estabilicen (Bueno Zabala, 2014; Letterman, 2001).

- **Ajustes de la alcalinidad**

El ajuste del pH en aguas subsaturadas con respecto al CaCO_3 no es una medida suficiente de control de la corrosión, por lo tanto es necesario aumentar las concentraciones de alcalinidad total y dureza cálcica, de tal manera que estas condiciones del agua permitan la formación de una capa protectora de CaCO_3 sobre las tuberías (Casey, 2009; De Sousa et al., 2010; Letterman, 2001).

- **Control de oxígeno**

Según De Sousa et al. (2010), concentraciones excesivas de O_2 elevan considerablemente el potencial corrosivo del agua en el sistema de conducción de agua potable; en la industria esta técnica es poco utilizada por sus elevados costos de implementación, es recomendable no realizar procesos de aireación para evitar aumentar las concentraciones de O_2 y mantener un rango de 0.2 a 0.5 ppm.

El ajuste de pH y alcalinidad como técnica de control de corrosión se puede realizar utilizando bases y carbonatos alcalinos tales como Ca(OH)_2 , NaOH , Na_2CO_3 , NaHCO_3 y CaCO_3 y pueden ser empleados en reactores, con pruebas de jarras para determinar su dosis óptima y en lechos empacados de contacto (Bueno Zabala, 2014).

2.4 LECHOS EMPACADOS DE CONTACTO

Un lecho es un reactor compacto por el cual se moviliza de manera ascendente o descendente un fluido que puede ser líquido o gas, su estructura es generalmente cilíndrica y se encuentra relleno de material de empaque el cual puede estar dispuesto de manera ordenada o al azar (Rivera, 2015; Urzúa & Caroca, 2008).

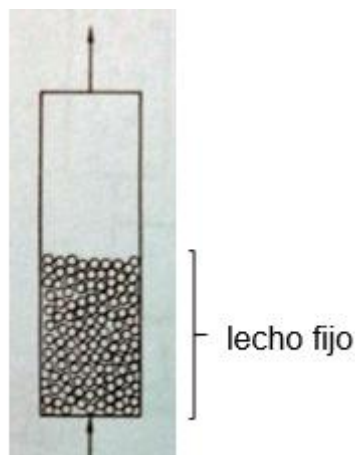
2.4.1 TIPOS DE LECHOS EMPACADOS

Según Levenspiel (1993), McCabe, Smith, Harriot, & Piombo Herrera (2007) y Moisés et al. (2010), las columnas de partículas sólidas o medios porosos que se pueden utilizar en la fluidización se clasifican básicamente en dos tipos: fijos y fluidizados.

2.4.1.1 LECHOS FIJOS

Las partículas no se separan unas de otras debido al paso sinuoso del fluido, se mantienen constantes tanto la altura como la fracción de vacíos dentro del lecho (porosidad ϵ); este tipo de lechos provoca que el fluido experimente la mayor caída de presión (McCabe et al., 2007). La Figura 2.4 presenta una columna de lecho fijo.

FIGURA 2.4 COLUMNA CON LECHO FIJO



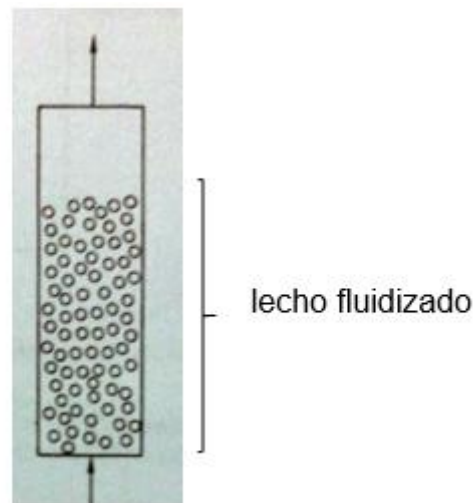
Fuente. (McCabe et al., 2007)

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

2.4.1.2 LECHO FLUIDIZADO

El material de empaque es arrastrado por el movimiento del fluido a través del lecho; las partículas que lo componen quedan suspendidas debido al incremento de la velocidad del fluido provocando un incremento en la caída de presión y el rozamiento sobre las partículas, esta velocidad toma el nombre de velocidad mínima de fluidización y es la velocidad en la cual las partículas comienzan a moverse para después quedar suspendidas en el fluido (Levenspiel, 1993; McCabe et al., 2007). La Figura 2.5 presenta una columna de lecho fluidizado.

En el lecho fluidizado la altura del lecho aumenta a medida que el fluido sobrepasa la velocidad mínima de fluidización, pero sí se reduce gradualmente la velocidad mínima, la altura del lecho irá disminuyendo (Levenspiel, 1993; McCabe et al., 2007).

FIGURA 2.5 COLUMNA CON LECHO FLUIDIZADO

Fuente: (McCabe et al., 2007)

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

2.4.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL CaCO_3

El CaCO_3 , es el compuesto principal de las rocas sedimentarias, de tipo carbonatadas, las principales en este grupo son las calizas, constituidas por 95% CaCO_3 , dolomitas compuestas por 90% de CaMgCO_3 y margas compuestas por mezclas de carbonatos y arcillas (Ponce & Gambaudo, 2005).

También existe un tipo de rocas llamadas metafóricas, dentro de las que se encuentra el mármol, que está compuesto principalmente de calizas y dolomías, en las que la presencia del CaCO_3 es superior al 95% (Ponce & Gambaudo, 2005).

Las propiedades más importantes del CaCO_3 son: color blanco amarillento, densidad: 2.7 g/cm^3 , olor: inodoro y estado natural sólido.

2.4.3 CARACTERIZACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN LECHO RELLENO

De acuerdo a Levenspiel (1993), Moisés et al. (2010) y Urzúa & Caroca (2008), los parámetros que caracterizan el comportamiento de un lecho empacado son los

siguientes: esfericidad, diámetro de partícula, porosidad, densidad, tiempos de retención.

2.4.3.1 ESFERICIDAD

Es la relación entre la superficie de una partícula y de una esfera de un volumen igual a ésta y sirve para caracterizar la forma de partículas irregulares o no esféricas (Levenspiel, 1993).

$$\phi = \left(\frac{\text{superficie de la esfera}}{\text{superficie de la partícula}} \right) \quad (2.12)$$

Los valores estudiados por Levenspiel (1993) para diferentes formas de partícula se encuentran detallados en la Figura 2.6, se seleccionó un valor de esfericidad igual a 0.6 para sólidos triturados debido a que el material de empaque utilizado en el presente trabajo fue CaCO₃ triturado.

FIGURA 2.6 ESFERICIDAD DE PARTICULAS

FORMA DE LA PARTÍCULA	ESFERICIDAD ϕ
Esfera	1.0
Cubo	0.81
Cilindro	
h=d	0.87
h=5d	0.70
h=10d	0.58
Discos	
h=d/3	0.76
h=d/6	0.60
h=d/10	0.47
Arena de Playa	Tan alta como 0.86
Arena de río	Tan baja como 0.53
Promedio para diferentes tipos de arena	0.75
Sólidos triturados	0.5 – 0.7
Partículas granulares	0.7 – 0.8
Trigo	0.85
Anillos Raschig	0.26 – 0.53
Sillas Berl	0.30 – 0.37
Sillas de níquel	0.14

Fuente. (Levenspiel, 1993)

2.4.3.2 DIÁMETRO DE PARTÍCULA

Según Levenspiel (1993), el diámetro de partículas no esféricas “Dp” es el diámetro de una esfera equivalente de mismo volumen y es útil para el entender el

comportamiento del fluido en el lecho, existen varios métodos de determinar el D_p los cuales dependen del tamaño.

Según Moisés et al. (2010), en partículas grandes con diámetros mayores a 1 mm se puede determinar el D_p conociendo el volumen desplazado por un número de partículas; a partir del cálculo del diámetro de una esfera equivalente con la ecuación 2.13 y conociendo el valor de esfericidad se puede determinar el D_p con la ecuación 2.14.

$$D_{eq\ esf} = \left(\frac{6V}{n\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.13)$$

$$D_p = D_{eqesf} * \emptyset \quad (2.14)$$

V =volumen desplazado

\emptyset =esfericidad

2.4.3.3 POROSIDAD

También llamada también fracción de vacíos “ ϵ ”, se define como la relación entre el volumen de vacíos o huecos y el volumen total del lecho (Levenspiel, 1993).

$$\epsilon = \frac{V\ \text{huecos en el lecho}}{V\ \text{total del lecho}} \quad (2.15)$$

Según Moisés et al. (2010) y Pujos (2015) a partir de la ecuación 2.16, la determinación experimental consiste en establecer el volumen de agua necesario para desplazar el aire en el lecho que permita encontrar el volumen de huecos en el lecho y dividirlo para el volumen total del lecho

$$\epsilon = \frac{(V\ \text{total} + V\ H_2O) - V\ \text{lecho húmedo}}{V\ \text{total}} \quad (2.16)$$

$V\ \text{total}$ = volumen del lecho + volumen de vacíos

$V\ H_2O$ = volumen de agua necesario para llenar el lecho

$V\ \text{lecho húmedo}$ = volumen resultante al introducir el agua en el lecho

2.4.3.4 DENSIDAD

Al definir la densidad se debe diferenciar entre densidad real y densidad aparente, la relación del peso de un material con respecto a su volumen se conoce como densidad real; si se toma en cuenta la porosidad del material y las grietas en su superficie se habla de densidad aparente (Pujos, 2015).

Levenspiel (1993) y Pujos (2015) definen a la densidad real (p_r) a la relación del volumen de un fluido (V) con el peso conocido de determinadas partículas (w) ecuación 2.17 y la densidad aparente (p_a) como al volumen que ocupa un peso determinado de partículas (V_{total}) ecuación 2.18.

$$p_r = \frac{w}{V} \quad (2.17)$$

$$p_a = \frac{w}{V_{total}} \quad (2.18)$$

Según Pujos (2015), al conocer el valor de porosidad se puede calcular la densidad real del lecho con la ecuación 2.19.

$$p_r = \frac{p_a}{1 - \epsilon} \quad (2.19)$$

2.4.3.6 ÁREA INTERFACIAL

Es la superficie de contacto expuesta por cada unidad de volumen de material de relleno, en la que se puede dar un contacto directo entre el fluido y el material de empaque, mientras menor es el diámetro de la partícula mayor será el área interfacial del lecho (Levenspiel, 1993; McCabe et al., 2007).

$$a = \frac{6(1 - \epsilon)}{D_p * \phi * \epsilon} \quad (2.20)$$

2.4.3.7 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAULICO (t_r)

Es el tiempo en el que una partícula de fluido permanece en el lecho, es el lapso en el que una partícula entra en el filtro y tarda en salir del mismo (Flores, 2006).

Su cálculo viene dado por el cociente entre el volumen del lecho y el caudal de aplicación sobre el mismo.

$$t_r = \frac{V_L}{Q} \quad (2.21)$$

Donde:

V_L = Volumen del lecho (L)

Q = Tasa de aplicación (L/min)

2.5 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA

El coeficiente de transferencia de masa indica la rapidez con la que un componente es transferido de una fase a otra; además controla la rapidez con la que el sistema llega al equilibrio (McCabe et al., 2007; Padilla, 2013a).

Cuando en el sistema prevalece la difusión molecular, los coeficientes de transferencia de masa difieren entre sí para los diferentes componentes de una fase, sin embargo cuando existen condiciones de turbulencia y la difusión molecular carece de importancia los coeficientes tienden a ser similares para todos los componentes del sistema (McCabe et al., 2007; Padilla, 2013b).

Existen algunos principios y correlaciones para relacionar los coeficientes de transferencia con la difusividad, la intensidad del movimiento y otras propiedades del fluido detalladas a continuación.

2.7.1 CORRELACIONES PARA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA

Según Perry, Green, & Maloney (2001), el coeficiente de transferencia de masa es el cociente entre el flujo y una diferencia de concentración.

$$kc = \frac{J_A}{C_{Ao} - C_{Af}} \quad (2.22)$$

Donde:

kc = coeficiente de transferencia de masa

J_A = flujo difusivo de A en la superficie entre el sistema y el entorno

C_{Ao} = concentración de A en la superficie del fluido

C_{Af} = Concentración de A en el volumen del fluido

Los coeficientes de transferencia de masa definidos en la ecuación 2.22, tienen en cuenta las propiedades físicas del sistema tales como la difusividad (D_{AB}), densidad del fluido (ρ), y la viscosidad (μ) y el movimiento del fluido (Perry et al., 2001).

Si el coeficiente de transferencia de masa es conocido, la estimación de la difusividad es sencilla; caso contrario su cálculo se torna complejo, para evaluarlo se utilizan correlaciones basadas en experimentaciones que envuelven una variedad de condiciones (Perry et al., 2001).

Según Bird, Stewart, & Lightfoot (1975) y Perry et al. (2001), el enfoque más antiguo y utilizado es la teoría de la película e indica que la diferencia de concentraciones existentes entre la mayor parte del fluido y la superficie, está localizada en una capa delgada viscosa llamada película que es adyacente a la superficie, en la que el transporte de solutos ocurre por difusión molecular.

El flujo del componente A en la teoría de la película viene dado por la ecuación 2.23.

$$J_A = kc(C_{Ao} - C_{Af}) = \frac{D_{AB}}{\delta}(C_{Ao} - C_{Af}) \quad (2.23)$$

Donde:

δ : espesor de la película que depende de las condiciones del movimiento del fluido.

D_{AB} : Difusividad del componente A hacia componente B.

Este modelo no permite definir claramente el valor del coeficiente de transferencia de masa debido a la dificultad de conocer el valor del espesor de la película δ , lo único que permite es predecir que bajo las mismas condiciones de fluido los coeficientes de transferencia de masa están en la misma proporción que las difusividades moleculares (Cussler, 2009a; Perry et al., 2001).

Las correlaciones utilizadas para el cálculo del coeficiente de transferencia de masa vienen dadas en función de números adimensionales, tales como el número de Sherwood y Stanton que implican directamente al coeficiente de transferencia de masa, los números de Schmidt, Lewis y Prandtl que relacionan e involucran a diferentes tipos de difusión y finalmente los números de Reynolds, Grashof y Peclet encargados de describir el flujo (Cussler, 2009b; Geankopolis, 1998; Perry et al., 2001).

Cussier (2009), menciona que teóricamente el coeficiente de transferencia de masa puede ser definido como una función de los números de Reynolds y Schmidt; tal función, ecuación 2.24, puede obtenerse combinando modelos teóricos y correlaciones de datos experimentales.

$$Sh = f(Re, Sc) \quad (2.24)$$

Donde:

Sh: número de Sherwood

Re: número de Reynolds

Sc: número de Schmidt

El número de Sherwood se define con la ecuación 2.25 y relaciona una longitud característica ℓ y el espesor de la película δ .

$$Sh = \frac{kc * \ell}{D_{AB}} \quad (2.25)$$

El número de Reynolds representa las condiciones de movimiento del fluido, para este caso se define con la ecuación 2.26.

$$Re = \frac{\rho v \ell}{\mu} \quad (2.26)$$

Donde:

ρ = densidad del fluido

μ = viscosidad del fluido

v = velocidad del fluido

ℓ = longitud característica

El número de Schmidt representa la relación entre la difusividad de momento, μ / ρ y la difusividad, y se define con la ecuación 2.27.

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad (2.27)$$

Las correlaciones de las ecuaciones 2.25, 2.26 y 2.27 responden a condiciones específicas en las que fueron desarrolladas y para ser utilizadas se debe realizar un modelo experimental replicando las condiciones en las que se obtuvieron; también es posible la determinación del coeficiente de transferencia de masa a partir de datos experimentales sin desarrollar un modelo matemático y su teoría se presenta a continuación.

2.7.2 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES

Según McCabe et al. (2007), la ecuación utilizada para calcular la altura de una torre empacada se define de la siguiente manera.

$$Z = N_{OL} \cdot H_{OL} \quad (2.28)$$

Donde:

Z = altura del lecho empacado

N_{OL} = número total de unidades de transferencia N_{OL}

H_{OL} = altura de la unidad de transferencia

- **Número de unidades de transferencia**

De acuerdo a McCabe et al. (2007), el número de unidades de transferencia para la fase líquida N_{OL} se define como el cambio de concentración en la fase líquida dividido para la fuerza impulsora promedio y se calcula utilizando la ecuación 2.29.

Según McCabe et al. (2007), la integral de la ecuación 2.29 se puede realizar utilizando el método de integración gráfica, por lo que es necesario construir la gráfica presentada en la Figura 2.7, que utiliza las concentraciones iniciales, finales y de equilibrio del componente estudiado presente en el fluido que atraviesa el lecho empacado.

$$N_{OL} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{x^* - x} \quad (2.29)$$

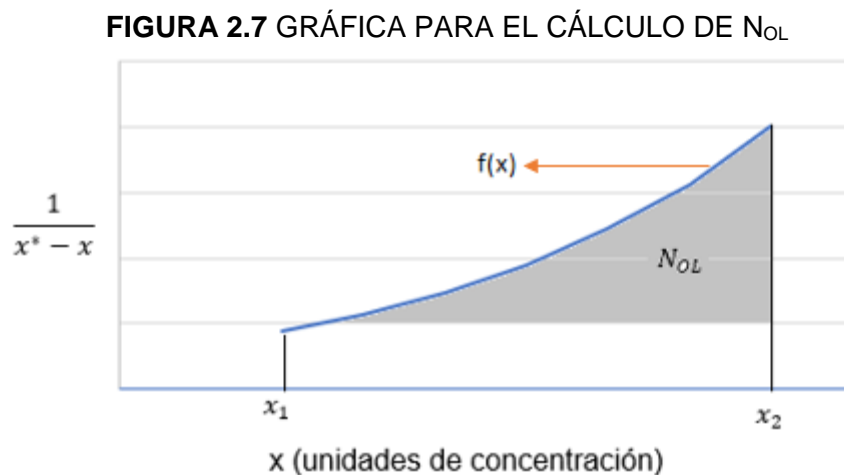
Donde:

x = concentración del componente

x_1 = concentración en el afluente

x_2 = concentración en el efluente

x^* = concentración en equilibrio



Fuente: (McCabe et al., 2007)

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

A partir de la gráfica de la Figura 2.7 se realiza una regresión lineal para obtener la ecuación $f(x)$, que integrada entre x_1 y x_2 represente el área bajo la curva y a su vez el valor de N_{OL} .

- **Altura de la unidad de transferencia**

McCabe et al. (2007) define a la altura de la unidad de transferencia " H_{OL} " como la altura de una sección de la torre empacada, que se requiere para lograr un cambio de concentración igual a la fuerza promedio impulsora en dicha sección.

$$H_{OL} = \frac{L}{K_L * a} \quad (2.30)$$

El valor de N_{OL} y Z permite con la ecuación 2.28 calcular el valor de H_{OL} y a partir de la ecuación 2.30 obtener el valor de K_L

Donde:

- L = tasa de aplicación del fluido (kg/h)
- S = área transversal de la columna (m^2)
- a = área interfacial del lecho (m^2/m^3)
- H_{OL} = altura de una sección de la torre empacada
- K_L = coeficiente de transferencia de masa global en la fase líquida
- $K_L * a$ = coeficiente volumétrico de transferencia de masa

En muchas ocasiones debido a la dificultad de determinar el área interfacial de los lechos empacados " a ", se expresa el coeficiente de transferencia de masa en función de la unidad de volumen del lecho y no en función de la unidad de área interfacial, se despeja el producto " $K_L a$ " este valor se conoce como coeficiente volumétrico de transferencia de masa.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN BASE

3.1.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA

En las entidades gubernamentales ecuatorianas encargadas del manejo, control y tratamiento del agua como son SENAGUA, EPMAPS, Consejo Provincial de Pichincha (CPP), la información sobre la calidad y potencialidad del recurso hídrico subterráneo es escasa e incompleta, sin embargo a través del Ing. Patricio Toapanta profesional del CPP, se logró ubicar pozos de agua subterránea en las áreas periféricas de Santo Domingo de los Tsáchilas, en las cooperativas de vivienda Libre Ecuador, María del Rosario y Nueva Aurora.

Se planificó un muestreo de las aguas subterráneas, mismas que fueron conservadas a 4°C y trasladadas al laboratorio TRAHISA, ubicado en la ciudad de Quito para su análisis.

A partir de los parámetros analizados en el muestreo se seleccionó el pozo de agua subterránea de la cooperativa de vivienda Nueva Aurora para realizar la experimentación con el lecho empacado.

3.1.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS YACIMIENTOS DE CaCO_3

Los yacimientos de CaCO_3 existentes en el Ecuador fueron localizados en internet; 3 provincias explotan este material: Imbabura, Guayas y Chimborazo y son comercializados por 3 empresas LACEC Cía. Ltda., LA ROCA S.A. y DISCAL.

Debido a que LACEC Cía.Ltda. comercializa únicamente caliza en polvo de tamaño de partícula (2-600 μm) se adquirieron muestras de las 2 empresas restantes para posteriormente seleccionar la de mayor pureza.

3.2 DETERMINACIÓN DE % DE PUREZA DE CaCO₃

En las muestras de CaCO₃ comerciales adquiridas en las empresas LA ROCA S.A. y DISCAL, la determinación del % de pureza de CaCO₃, se realizó siguiendo la metodología expuesta en el Manual de Laboratorio del Departamento de Fisicoquímica de la UNAM, descrita por Zamora Martínez & Colín, (2014), cuyo procedimiento se detalla a continuación.

1. Pulverizar en un mortero cada una de las muestras de CaCO₃ comercial.
2. Pesar aproximadamente 0,15 g de muestra y transferir a un matraz de 125 ml.
3. Añadir 10 ml de agua destilada y 35 ml de HCl 0.1N (f=0,99), agitar la mezcla hasta la dilución total del CaCO₃.
4. Adicionar 3 gotas de indicador fenolftaleína.
5. Titular la solución con NaOH 0.1N (f=0,97) hasta el viraje del indicador a color rosa.
6. Registrar los ml de titulante gastados.
7. A partir del gasto del titulante determinar estequiométricamente las moles en exceso de HCl que reaccionan con el CaCO₃ y obtener la cantidad real de CaCO₃ que disuelto en el HCl 1N existieron en las muestras analizadas.

La metodología expuesta se realizó por triplicado para obtener un valor representativo de alta confiabilidad; el Anexo 1 muestra los cálculos del procedimiento. Se seleccionó como material de empaque para la construcción de los lechos la muestra de la empresa LA ROCA S.A. debido a que presentó mayor pureza de CaCO₃.

3.3 CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL SISTEMA

3.3.1 VARIABLES DEL PROCESO

Debido a que el proyecto es continuación de la investigación de Castro (1992), tanto la altura como el diámetro de la columna se tomaron como referencia para la construcción de los lechos. Las variables experimentales del proceso de estabilización química fueron las tasas de aplicación hidráulica y los tamaños de partícula del material de empaque presentados en la Tabla 3.1.

TABLA 3.1 VARIABLES DE OPERACIÓN EN EL LECHO

Granulometrías	Dp mm	Tasa de aplicación (L/min)			
		Q1	Q2	Q3	Q4
G1	0,84	0,095	0,199	0,301	0,406
G2	1,18	0,094	0,204	0,301	0,404
G3	6,365	0,094	0,199	0,302	0,402
G4	10,50	0,093	0,201	0,299	0,409

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

3.3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de lechos empacados funcionó a gravedad; se construyó los 4 lechos empacados con tubos de vinilo transparente de 1m de alto, 3.175 cm de diámetro y 40 cm de altura de relleno; cada lecho fue empacado con CaCO₃, de 4 diferentes granulometrías G1, G2, G3 y G4 con diámetros de partícula Dp: 0,85, 1.19, 4.72 y 9.52 mm respectivamente; la Figura 3.1 muestra los lechos empacados con todos sus accesorios, instalados en un soporte de madera.

3.3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MATERIAL DE EMPAQUE

3.3.3.1 DIÁMETRO DE PARTÍCULA

La empresa LA ROCA S.A. comercializa mármol en 4 diferentes tamaños de partícula; la Tabla 3.2 muestra el tamaño de partícula para cada malla comercializada respectivamente.

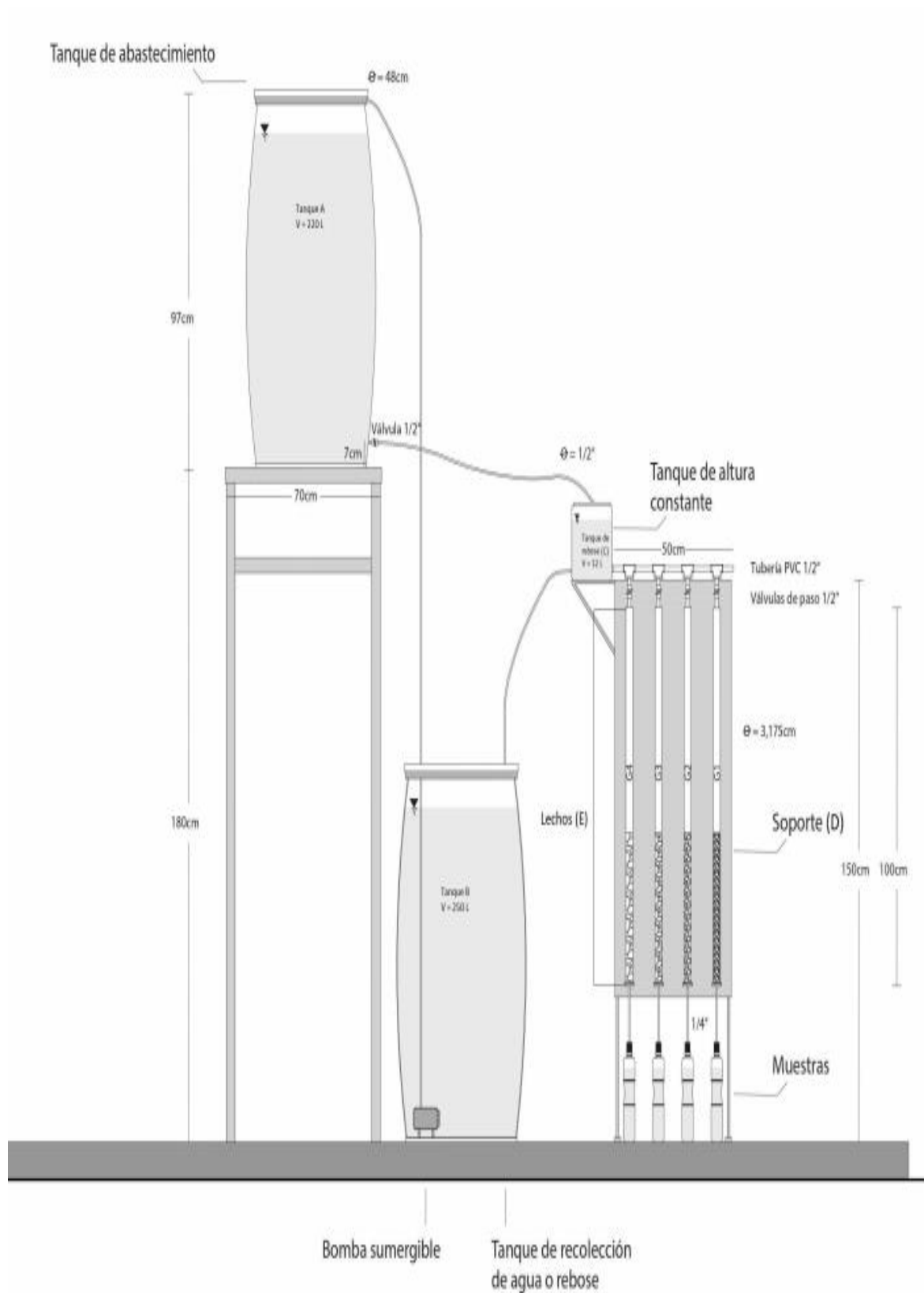
TABLA 3.2 TAMAÑO DE PARTICULAS DE MUESTRAS COMERCIALES DE CaCO₃, EMPRESA LA ROCA S.A., 2017

Nombre comercial	Dp (mm)
Malla 0	0,044 - 0,0740
Malla 1	0,707 – 1
Malla 2	1-5
Malla 3	5-13

Fuente: LA ROCA S.A.

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

FIGURA 3.1 SISTEMA UTILIZADO EN EL TRABAJO EXPERIMENTAL



Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

Según Sallanko et al. (2013) y Gude (2010), para la estabilización química de aguas corrosivas con CaCO_3 , el Dp del material de empaque debe estar entre 0,5 a 10 mm, por tal motivo se realizó el tamizado de las mallas comerciales para obtener 4 fracciones granulares que estén dentro del rango sugerido; el proceso se realizó en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Suelos (LEMSUR) de la FICA, siguiendo la metodología propuesta por la norma ASTM D-42263 utilizando un agitador granulométrico Tokio Tanifuji Co.LTD, detallada a continuación.

1. Cuartear el material para obtener una muestra representativa y homogénea (ver Figura 3.2).

FIGURA 3.2 CUARTEO DE MUESTRA DE MÁRMOL



Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

2. Depositar la muestra sobre el arreglo de tamices ASTM E-11-70 (ver Figura 3.3)

FIGURA 3.3 COLOCACION DE LA MUESTRA SOBRE LOS TAMICES.



Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

3. Ensamblar los tamices sobre el equipo de tamizaje y operar por 3 a 5 minutos (ver Figura 3.4).

FIGURA 3.4 TAMIZADO DE LA MUESTRA

Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

4. Recoger cada fracción granulométrica (ver Figura 3.5).

FIGURA 3.5 MATERIAL RECOGIDO SOBRE CADA TAMIZ

Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

La Tabla 3.3 presenta los tamices utilizados de la serie ASTM E-11-70 y los D_p retenidos sobre cada tamiz y estas fueron las 4 granulometrías con las que se experimentó en los lechos de contacto empacados.

Finalmente, para la experimentación se tamizó un total de 4 kg de cada una de las fracciones seleccionadas (G1, G2, G3, G4).

TABLA 3.3 Dp RETINIDOS DE LAS MUESTRAS COMERCIALES

Fracción granular	Nº Tamiz	Dp de material retenido sobre cada tamiz (mm)
G1	20	0,841
G2	16	1.19
G3	4	4.76
G4	3/8"	9.51

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

Con el propósito de verificar el Dp de las fracciones granulares seleccionadas para la experimentación se empleó el método de desplazamiento de volúmenes utilizando las ecuaciones detalladas en las secciones 2.4.3.1 y 2.4.3.2; previamente el mármol fue de lavado y secado para desechar posibles impurezas que puedan existir en las piedras tal como se indica en la Figura 3.6.

FIGURA 3.6 LAVADO Y SECADO DEL MARMOL

Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

Se siguió la metodología propuesta por Pujos (2015) y Moisés (2010) detallada a continuación.

1. Contabilizar n granos de la granulometría G1 y registrar su peso.
2. Medir 10 ml de agua en una probeta de 25 ml.
3. Colocar los granos de G1 en la probeta con agua.
4. Medir la variación de volumen en cada probeta.
5. Calcular el diámetro equivalente a una esfera utilizando la ecuación 2.13.
6. Calcular el D_p utilizando la ecuación 2.14.

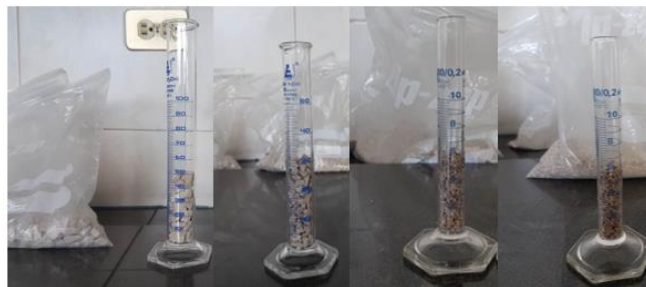
El procedimiento se realizó por triplicado y se replicó para G2, G3 y G4.

3.3.3.2 POROSIDAD Y DENSIDAD

La determinación de densidad y porosidad se realizó siguiendo la metodología de Pujos (2015), el procedimiento se detalla a continuación.

1. Pesar la probeta vacía y registrar su peso.
2. Depositar aleatoriamente 50 ml de granos G1 en la probeta; el volumen se lo denomina "V total".

FIGURA 3.7 GRANOS DEL MATERIAL COLOCADOS EN LAS PROBETAS



Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

3. Registrar el peso de los granos ocupado en la probeta y restar el peso registrado en el paso 1; el peso resultante se denomina "w".

FIGURA 3.8 MATERIAL PESADO

Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

- Colocar un volumen de agua que permita desplazar el aire contenido en el lecho; a este volumen se denomina “V H₂O”.

FIGURA 3.9 AGUA COLOCADA PARA DESALOJAR EL AIRE EN EL LECHO

Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

- Medir la variación que se produce en la probeta al añadir el volumen de agua. en el volumen total; la variación se denomina “V lecho húmedo”.
- Calcular la porosidad utilizando la ecuación 2.16.
- Calcular la densidad aparente utilizando ecuación 2.18.
- Calcular densidad real a partir de la ecuación 2.19.

El procedimiento se realizó por triplicado con el propósito de obtener datos representativos y se replicó para G2, G3 y G4.

3.3.3.3 ÁREA INTERFACIAL

La determinación se realizó utilizando la ecuación 2.20 detallada en el inciso 2.4.3.6.

3.3.4 PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA

Se preparó agua corrosiva sintética por acidificación del agua potable, dosificando 0,04 ml de HNO_3 por cada litro de agua, hasta registrar un pH = 5,5 a 6.

La Figura 3.1 indica el abastecimiento de agua sintética desde el tanque A hasta el C, que trabajó con rebose total y funcionó como tanque de carga constante para los lechos, localizados sobre el soporte de madera D. El agua de rebose fue enviada hacia el tanque B, por medio de una manguera de 1/2" y con ayuda de la bomba sumergible fue nuevamente depositada en el tanque de abastecimiento; las mangueras de 1/4", colocadas a la salida de los lechos empacados fueron utilizadas para realizar la toma de muestras; la operación del sistema se realizó cerrada a la atmósfera para evitar el contacto con el CO_2 atmosférico debido a su incidencia directa sobre el sistema carbonatos.

Las tasas de aplicación fueron medidas utilizando el método del aforo volumétrico, utilizando probetas de 10, 25 y 100 ml, y un cronómetro para registrar el tiempo de llenado de la probetas, además, según la norma INEN (2014) para obtener un caudal promedio se deben realizar 5 pruebas de aforo para conseguir un valor confiable, los resultados de las mediciones se muestran en el Anexo 3. Previamente a cada medición de las tasas de aplicación las llaves fueron abiertas en su totalidad purgándolas para eliminar todo el aire acumulado y evitar posibles errores en las tomas de muestra de agua, Figura 3.10

FIGURA 3.10 PURGA DE LLAVES PREVIO A EXPERIMENTACIÓN



Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

Previo a la experimentación, se puso en marcha el sistema 4 días durante 8 horas a flujo continuo a fin de ajustar el funcionamiento hidráulico. Se controlaron problemas de cavitación en las llaves que surgieron con las diferentes tasas de aplicación, pérdidas de carga excesivas producidas en los diferentes lechos, fugas de agua en diferentes uniones, se reguló la cantidad de agua en el tanque de rebose para evitar pérdidas innecesarias y se sellaron herméticamente los tanques para evitar el ingreso de aire al agua sintética.

La experimentación se llevó a cabo durante 2 semanas a temperatura ambiente, por un lapso de 8 h/día, de 9h00 a 17h00, cada día se trabajó con los flujos señalados en el inciso 3.3.1. El tiempo de retención hidráulico para cada lecho ocupado fue calculado a partir de la ecuación 2.21 detallada en el inciso 2.4.3.7; la Tabla 3.8 indica el tiempo de retención para cada tasa de aplicación; además se definió un tiempo de muestreo de 30 min.

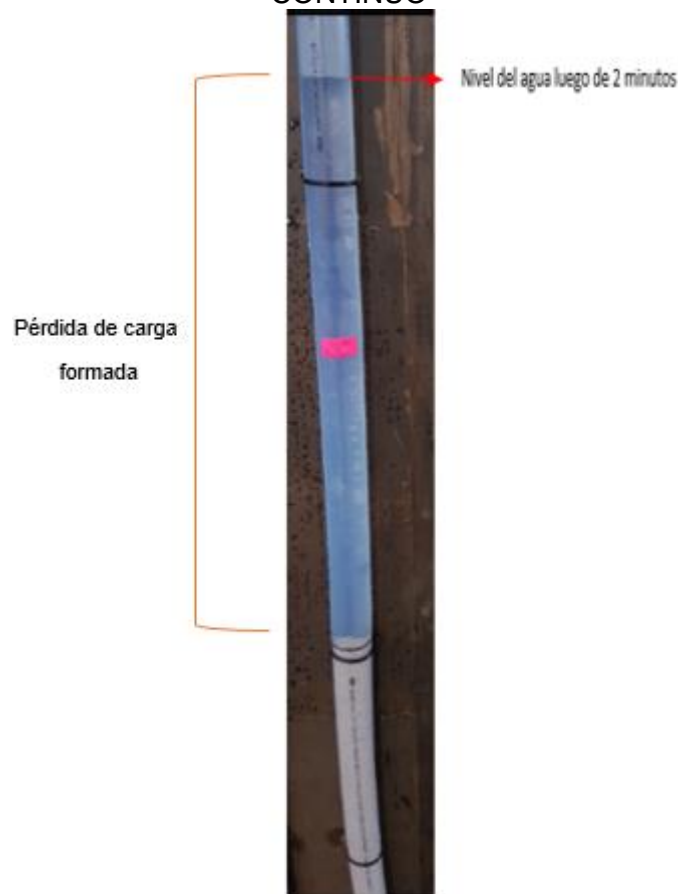
TABLA 3.4 TIEMPO DE RETENCIÓN PARA CADA TASA DE APLICACIÓN

Q (L/min)	tr (min)
Q1	8.42
Q2	4.16
Q3	2.63
Q4	1.9

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

La pérdida de carga producida a los 2 minutos de experimentación no permitió trabajar con las tasas de aplicación Q3 y Q4 para la granulometría G1; las pérdidas formadas se muestran en la Figura 3.11.

FIGURA 3.11 PÉRDIDA DE CARGA DEL LECHO CON G1 LUEGO DE 2 MIN A FLUJO CONTINUO



Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

Para garantizar que el valor inicial de CaCO_3 que se transfiere al agua sea siempre el mismo y debido a que en este trabajo de titulación no se estudió la durabilidad del material empacado, durante cada día de experimentación se colocó nuevo material en los lechos, Figura 3.12.

FIGURA 3.12 COLOCACIÓN DE TANDAS DE MARMOL PARA CADA EXPERIMENTACIÓN



Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

3.4 ENSAYOS DE ESTABILIZACIÓN

Una vez ajustado hidráulicamente el sistema se procedió a ejecutar los ensayos de estabilización inicialmente con agua sintética corrosiva y posteriormente con agua subterránea real.

3.4.1 ENSAYOS CON AGUA SINTÉTICA

A fin de que la calidad del agua se mantenga constante durante los días de experimentación el agua de alimentación a los lechos empacados fue analizada al inicio y al final del día por pH, alcalinidad, Ca^{2+} , temperatura y conductividad eléctrica de acuerdo a los métodos mostrados en la Tabla 3.9.

TABLA 3.5 PARÁMETROS QUÍMICOS ANALIZADOS EN EL EFLUENTE

Parámetro	Unidades	Método	Equipo
pH	-	4500-H ⁺ B	Multiparámetro Termo Scientific (Orión 5 Star)
Alcalinidad	mg CaCO_3 / L	2320-B	-
Dureza Cálcida	mg CaCO_3 / L	2340-C	-
Conductividad	$\mu\text{s}/\text{cm}$	4500-H ⁺ B	Multiparámetro Termot Scientific (Orión 5 Star)
Temperatura	°C	2550-B	Conductivity and temperature system YSI 30M

FUENTE (AWWA, 2012)

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

También fue necesario medir los sólidos totales suspendidos (TDS), parámetro requerido para el cálculo del I.L. Según el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2012), en un número grande de muestras los TDS pueden ser obtenidos a partir de la conductividad partiendo del conocimiento del factor de conductividad del ion presente en el agua; la Figura 3.13 indica los factores de conductividad que se presentan normalmente en aguas naturales; ya que el agua sintética preparada se encuentra en el rango de pH 5,8-6, donde existe predominancia de bicarbonatos, se utilizó un factor de 0,715,

FIGURA 3.13 FACTORES DE CONDUCTIVIDAD DE LOS IONES COMÚNMENTE ENCONTRADOS EN EL AGUA

Water Quality: Conductivity Factors of Ions Commonly Found in Water

Ion	$\mu\text{S/cm per ppm}$
Bicarbonato	0.715
Calcium	2.60
Carbonate	2.82
Chloride	2.14
Magnesium	3.82
Nitrate	1.15
Potassium	1.84
Sodium	2.13
Sulfate	1.54

Reproduced with permission of the American Institute of Chemical Engineers, copyright 1995 AIChE, all rights reserved.

Fuente: Branan, C. (2005)

Las muestras de los efluentes de los lechos empacados se tomaron en botellas de 400 ml y se llenaron en su totalidad para evitar el contacto mínimo del CO_2 ; tal como muestra la Figura 3.14

FIGURA 3.14 TOMA DE MUESTRAS A LA SALIDA DEL LECHO



Tomada por: De la Torre D.; Vaca F.

3.4.2 ENSAYOS CON AGUA SUBTERRÁNEA

Se experimentó con agua subterránea del pozo de la Cooperativa Nueva Aurora ubicada en la ciudad de Santo Domingo, la cual fue transportada en un tanque plástico de 250 l hacia el Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas de la DICA.

Se experimentó con la granulometría G2 y la tasa de aplicación Q1 condiciones con las que se logró la estabilización del agua sintética de laboratorio.

3.5 CÁLCULO DE ÍNDICES DE CORROSIÓN Y COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA.

3.5,1 ÍNDICE DE LANGELIER

- Se calculó a partir de las ecuaciones 2.6 y 2.7 mencionadas en el inciso 2.3.1.1, utilizando los datos experimentales obtenidos y procesados con el software Excel.
- Los datos de TDS experimentales y el factor de conductividad 0,715 permitieron obtener el esfuerzo iónico, u , utilizando la ecuación 2.10,
- Con las ecuaciones 2.8 y 2.9 se calculó pka_{2c} y $pkso_c$, requeridos para calcular el pH de saturación (pHs).
- Con los valores de alcalinidad, Ca^{2+} , pka_{2c} y $pkso_c$ se calculó el valor de pHs utilizando la ecuación 2.7
- Finalmente, con la ecuación 2.6 se calculó el valor de I.L..

3.5,2 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA

Para la determinación de K_L se trabajó con los valores obtenidos para un mayor grado de neutralización y se siguió la metodología detallada a continuación.

- Construir la gráfica para el cálculo del No_L a partir de los datos experimentales seleccionados.
- Realizar la integración gráfica para resolver la ecuación 2.29 y calcular el valor de N_{OL} .
- A partir del valor calculado de N_{OL} y con Z calcular el valor de H_{OL} con la ecuación 2.28.
- Calcular el valor de K_L con la ecuación 2.30,

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DEL MUESTREO PREVIO PARA LA SELECCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

La Tabla 4.1 muestra los resultados de los parámetros analizados en las áreas periféricas de Santo Domingo de los Tsáchilas, en las cooperativas de vivienda Libre Ecuador, María del Rosario y Nueva Aurora, resultando el agua más corrosiva la de la cooperativa Nueva Aurora con un I.L.=-2,276.

TABLA 4.1 CALIDAD DE AGUA PARA 3 MUESTRAS DE AGUA SUBTERRANEA, SANTO DOMINGO DE LOS TSACHILAS, 2017

Parámetro	Muestra 1		Muestra 2	Muestra 3
	Coop. Libre Ecuador		Coop. María del Rosario	Coop. Nueva Aurora
pH	--	6,72	7,22	6,53
Alcalinidad	mg CaCO ₃ / L	40,795	55,72	48,76
Ca ²⁺	mg CaCO ₃ / L	25,62	32,52	34,15
TDS	mg / L	214,5	169,45	174,17
I.L.	--	-0,401	-0,518	-2,276
Hierro Total	mg/l	1,71	0,1	2,2
Hierro Soluble	mg/l	1,06	0,08	2,13

TDS= Sólidos Totales Disueltos

I.L.= Índice de Langelier

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

4.2 RESULTADOS DEL % DE PUREZA DE CaCO₃

La Tabla 4.2 muestra los resultados del % de pureza, evidenciando que la muestra de la empresa LA ROCA S.A. tiene un 95,56% de CaCO₃.

TABLA 4.2. % PUREZA DEL CaCO₃ DE LAS EMPRESAS LA ROCA Y DISCAL, 2017

Muestra	Repetición	Peso de la muestra (g)	Peso de CaCO ₃ (g)	%de pureza de CaCO ₃	
LA ROCA S.A.	1	0,1501	0,1437	95,71	95,56
	2	0,1504	0,1427	94,87	
	3	0,1500	0,1442	96,10	
DISCAL	1	0,1500	0,1412	94,14	93,86
	2	0,1502	0,1402	93,36	
	3	0,1506	0,1417	94,09	

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

4.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE D_p, POROSIDAD Y DENSIDAD

4.3.1 D_p

Luego de seguir la metodología expuesta en la sección 3.3.3.1 se obtuvieron los valores de D_p presentados en la Tabla 4.3, mientras que en el Anexo 2 se indica el procesamiento de los datos conseguidos en laboratorio y un ejemplo de cálculo.

TABLA 4.3. DIÁMETROS DE PARTICULA UTILIZADOS EN LOS LECHOS.

Granulometría	D _p promedio (mm)
G1	0,852
G2	1,182
G3	4,690
G4	9,533

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

4.3.2 POROSIDAD Y DENSIDAD

La Tabla 4.4 presenta los valores obtenidos de densidad y porosidad para cada granulometría; además el Anexo 2 indica un ejemplo de cálculo y el procesamiento de los datos conseguidos en laboratorio.

TABLA 4.4. VALORES DE DENSIDAD Y POROSIDAD PARA CADA GRANULOMETRÍA

Granulometría	Dp (mm)	Densidad (g/ml)	Porosidad (%)
G1	0,85	2,276	43,4
G2	1,18	2,222	46,6
G3	4,75	2.600	49,4
G4	9,50	2,700	50,7

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

4.4 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA SINTÉTICA

Con el propósito de asegurar que la calidad del agua sintética conserve sus propiedades durante las 7 horas de experimentación se procedió a realizar un muestreo al inicio y a final de la experimentación; resultados que se muestran en la Tabla 4.5.

TABLA 4.5 CONTROL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA SINTÉTICA

Tasa de aplicación (l/min)	Tiempo (h)	T (°C)	pH	TDS (mg/l)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Calcio (mg Ca ²⁺ /l)
Q1	0	17	5,72	126,853	19,105	22,885
	7	17,1	5,68	127,829	20,895	21,951
Q2	0	17,0	5,97	127,560	11,27	19,351
	7	17,2	5,83	127,122	11,44	21,140
Q3	0	17,1	5,61	127,337	11,94	16,262
	7	17,1	5,86	127,345	10,95	16,262
Q4	0	17,1	5,73	124,910	14,93	16,262
	7	17,2	5,71	124,915	13,99	16,420

TDS= Sólidos Totales Disueltos

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

Los valores registrados indican que a pesar de mantener un sistema cerrado a la atmosfera pudieron existir ligeras interacciones del agua sintética con el CO₂ atmosférico, que provocaron ligeras variaciones de la calidad inicial, por tal motivo se procedió a realizar un promedio de las condiciones iniciales y finales del muestreo; la Tabla 4.6 presenta los valores promediados que fueron utilizados como datos iniciales para los cálculos pertinentes.

TABLA 4.6 CONDICIONES INICIALES PROMEDIO PARA EL AGUA CRUDA

Tasa de aplicación	T_{prom.} (°C)	pH prom.	TDS prom. (mg/l)	Alcalinidad prom. (mg CaCO₃/l)	Calcio prom. (mg Ca²⁺)
Q1	17,1	5,7	127,341	20	22,40
Q2	17,1	5,9	127,341	11,27	19,351
Q3	17,1	5,61	127,337	11,94	16,262
Q4	17,1	5,73	124,910	14,93	16,262

TDS= Sólidos Totales Disueltos

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

4.5 CALIDAD DEL AGUA SINTÉTICA ESTABILIZADA

La Tabla 4.7 presenta los valores obtenidos durante la experimentación en el lecho con granulometría G2 y tasa de aplicación Q1 con los que se logró estabilizar el agua sintética; el Anexo 4 indica los resultados para las demás tasas de aplicación y granulometrías; el Anexo 5 presenta un ejemplo de cálculo del I.L.

Según Bueno Zabala (2014), De Sousa et al. (2010), Letterman (2001) y Trujillo et al. (2008) el I.L. de 0,13 alcanzado luego de 6 horas de experimentación es un valor que indica que el agua está estabilizada químicamente, es decir no es corrosiva ni incrustante está en equilibrio con respecto al sistema carbonatos.

Con la finalidad de realizar un análisis comparativo del comportamiento de los parámetros de control (pH, Alc, TDS y Ca²⁺) con la influencia de la variación de la tasa

de aplicación hidráulica y el diámetro de partícula en el proceso de estabilización química del agua, se analizó cada parámetro de control en el tiempo.

TABLA 4.7 DATOS DE pH, ALCALINIDAD, Ca²⁺, TDS E I.L. PARA EL LECHO G2 Y TASA DE APLICACIÓN Q1

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T (°C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Calcio (mg Ca ²⁺ /l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,7	17,00	20,00	22,42	127,34	8,83	-3,13
1	0,5	6,47	17,50	48,00	38,43	173,32	8,22	-1,75
2	1	7,55	17,10	54,00	43,23	173,67	8,12	-0,57
3	1,5	7,46	17,00	57,00	38,43	172,89	8,15	-0,69
4	2	7,43	17,20	58,00	35,23	175,82	8,18	-0,75
5	2,5	7,44	17,20	62,00	38,43	175,68	8,11	-0,70
6	3	7,44	16,40	59,00	43,23	174,46	8,08	-0,64
7	3,5	7,41	16,80	60,00	44,84	174,25	8,06	-0,65
8	4	7,77	16,90	68,00	49,64	175,18	7,96	-0,19
9	4,5	7,57	16,70	81,00	51,24	175,32	7,87	-0,30
10	5	7,66	17,00	74,00	46,44	175,75	7,95	-0,29
11	5,5	7,96	17,10	78,00	49,64	179,54	7,90	0,06
12	6	7,97	17,10	82,00	54,44	181,97	7,84	0,13
13	6,5	7,97	17,50	73,00	52,84	178,61	7,90	0,07
14	7	7,98	18,00	72,00	51,24	182,47	7,92	0,06

TDS = Sólidos Totales Disueltos

I.L. = Índice de Langelier

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

4.5.1 pH

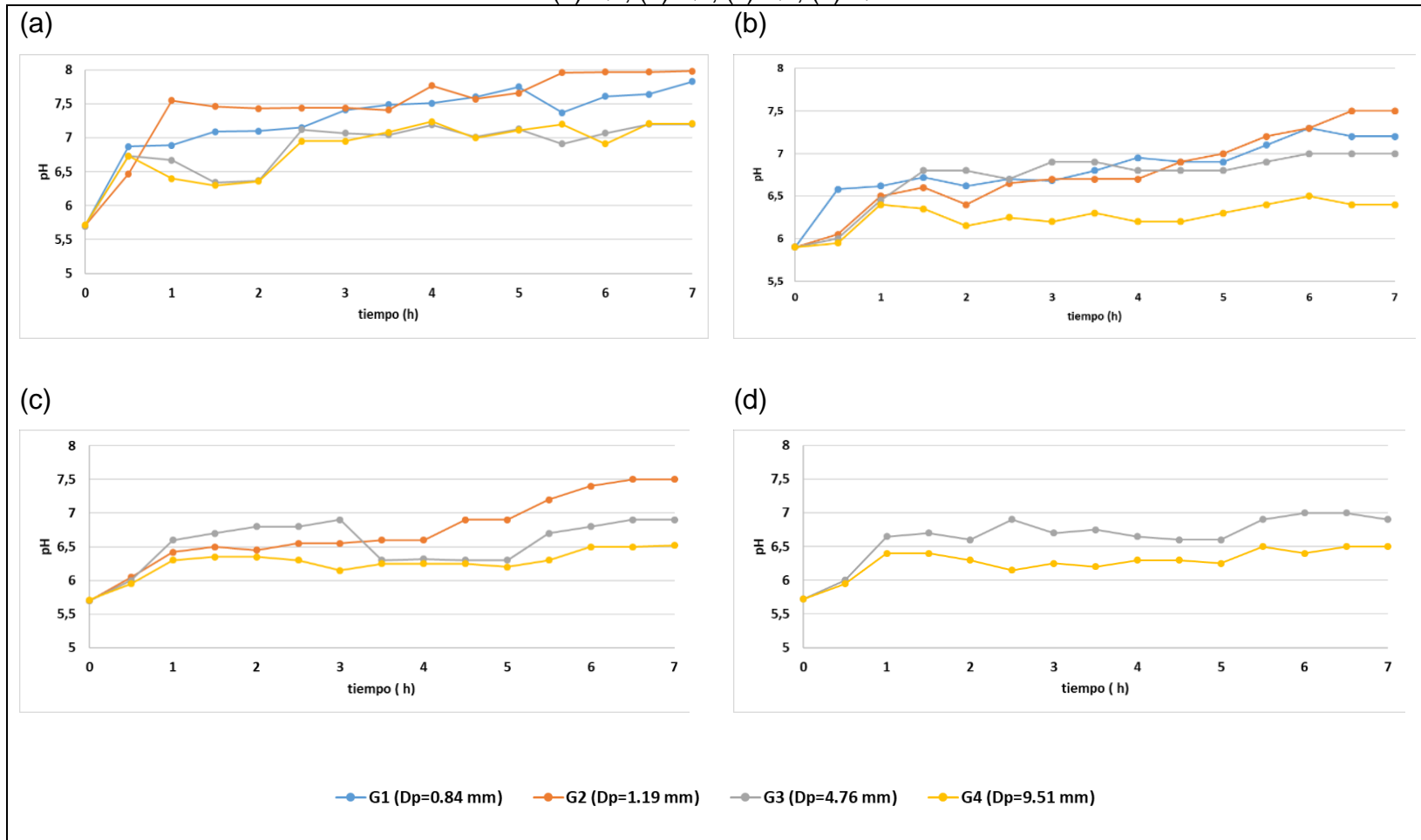
La Figura 4.1 representa la variación del pH en el tiempo para cada tasa de aplicación y granulometría de experimentación; además indica que los lechos de contacto de CaCO_3 cumplen su función de incrementar el pH de las aguas con carácter corrosivo y se observa que el aumento de pH es menor conforme incrementan Q y G.

Se observa que para Q1 se inició con pH inicial de 5,7 y después de fluir el agua por cada lecho empacado con un tiempo de retención de 8.42 min, los valores de pH fueron incrementando otorgando a las aguas un carácter neutro ($\text{pH} > 7$), de esta manera se puede observar que tanto G1 y G2 alcanzaron incrementar el pH hasta valores de 7.83 y 7.93 respectivamente.

Sin embargo el pH alcanzado por G1 no fue suficiente para lograr estabilizar el agua debido a que los otros parámetros de control no lograron alcanzar los valores necesarios para estabilizar el agua, en contraste a lo sucedido con G2 que alcanzó la estabilización.

La Figura 4.1 c y d indica que G3 y G4 no alcanzan pH superiores a 7 debido a que al incrementar la tasa de aplicación disminuye el tiempo de retención del fluido en el lecho y por lo tanto el tiempo de contacto que tiene el agua con las partículas de cada lecho es menor; de igual manera al incrementar la granulometría el área de contacto interfacial del material de relleno disminuye; estas dos condiciones influyen en la disolución del CaCO_3 en el agua y son responsables del incremento del pH en aguas ácidas (Bueno Zabala, 2014; De Sousa et al., 2010).

FIGURA 4.1 VARIACIÓN DE pH PARA CADA TASA DE APLICACIÓN
 (a) Q1, (b) Q2, (c) Q3, (d) Q4



Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

4.5.2 ALCALINIDAD

La Figura 4.2 representa la variación de la alcalinidad en el tiempo para cada tasa de aplicación y granulometría.

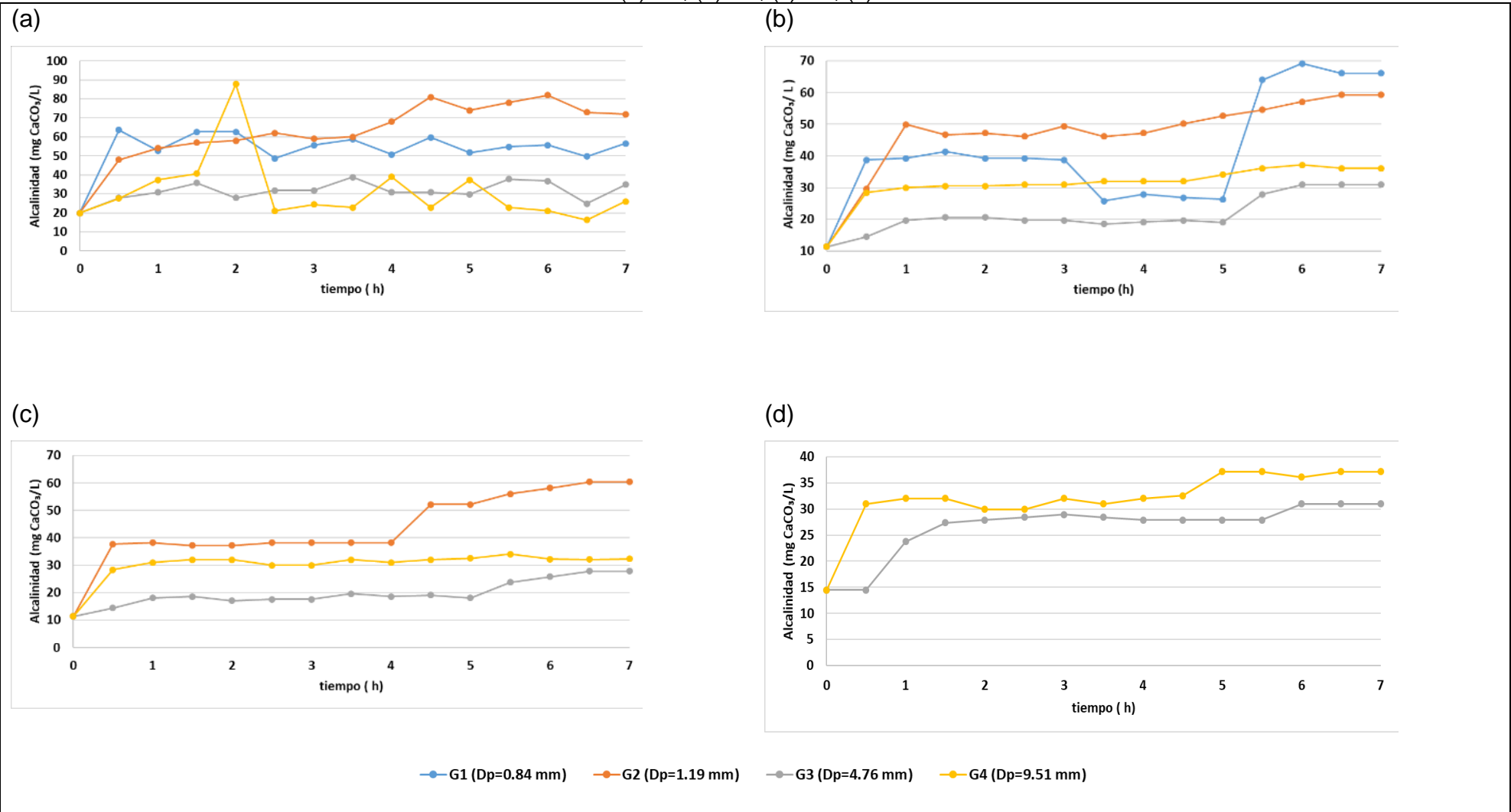
La alcalinidad de un agua neutraliza ácidos debido a la capacidad de aceptar iones hidrógeno, además de determinar la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidroxilos, este parámetro es importante ya que es un indicador de una agua desestabilizada.

Según Pauta y Quezada (2017), Bueno Zabala (2014) y De Sousa et al.(2010) aguas estabilizadas tienen como característica valores de alcalinidad superiores a 40 mg CaCO_3/l ; además Casey (2009) y Sallanko et al. (2013) mencionan que los valores de alcalinidad se encuentran en un rango de 40 a 80 mg CaCO_3/l ; G1 y G2 en la Figura 4.2 (a) alcanzan alcalinidades dentro del rango, es por esto que G2 en conjunto con los otros parámetros de control medidos logran estabilizar el agua, la G1 se encuentra dentro de rango y esta podría también estabilizarse en un tiempo de contacto mayor.

Las Figuras 4.2 (a) (b) (c) y (d) muestran que al experimentar en los lechos empacados con G3 y G4 no se alcanza alcalinidades que permitan estabilizar aguas con carácter corrosivo en el tiempo de experimentación realizado.

Cambios bruscos en los valores de alcalinidad medidos durante la experimentación representados en la Figura 4.2(a) para G4, en 4.2(b) para G1 y en 4,2(c) para G2 podrían ser atribuidos principalmente al ingreso del CO_2 atmosférico en la muestra tomada a la salida del lecho, estos errores se pudieron presentar por el burbujeo al momento de la titulación pese a todas las precacuciones tomadas en el momento de la titulación insitu.

FIGURA 4.2 VARIACIÓN DE ALCALINIDAD PARA CADA TASA DE APLICACIÓN
 (a) Q1, (b) Q2, (c) Q3, (d) Q4



Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

4.5.3 CALCIO

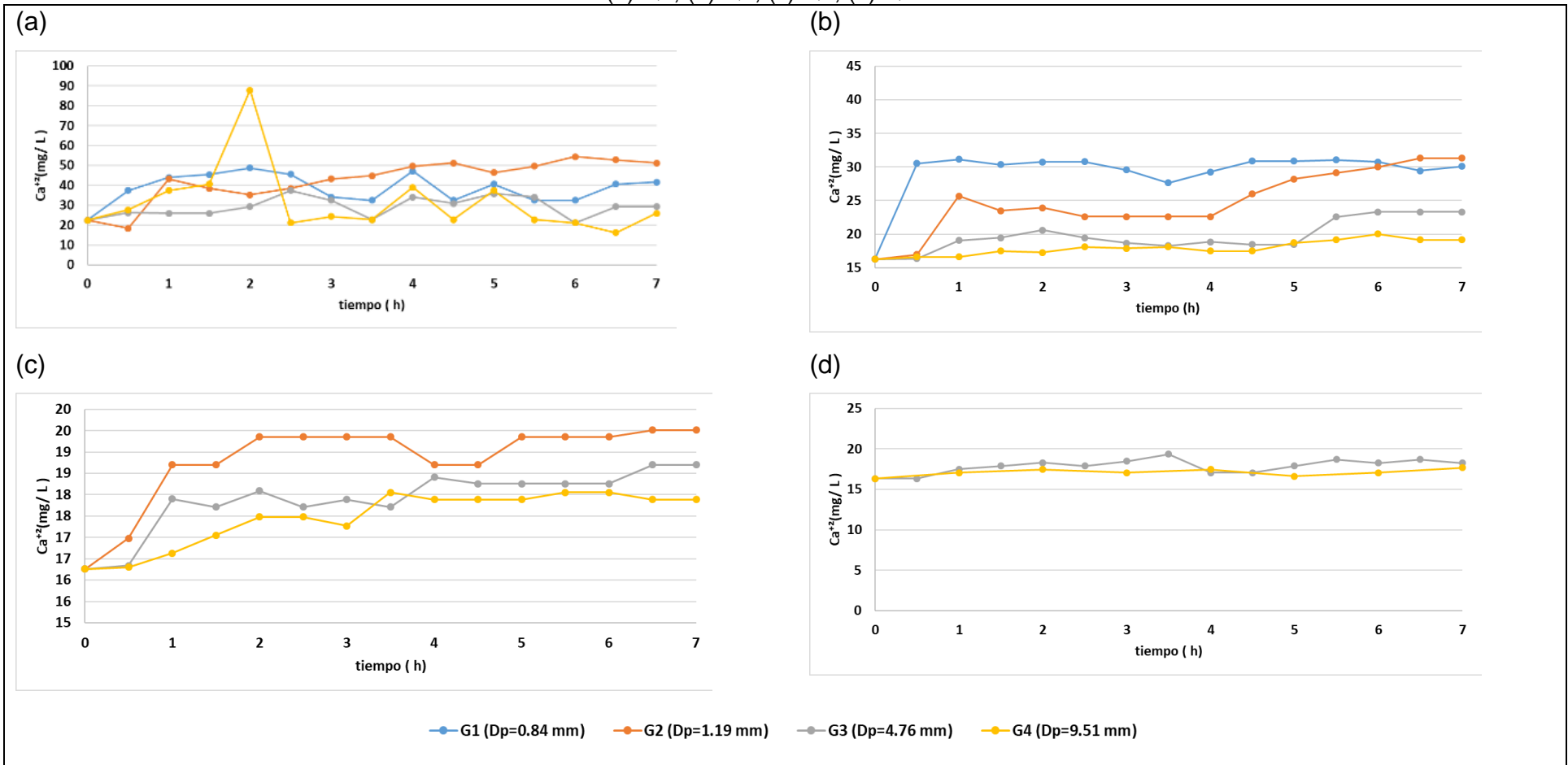
La Figura 4.3 representa la variación del Ca^{+2} a lo largo del tiempo de experimentación, se puede observar que el material de empaque de los lechos ceden Ca^{+2} incrementando su concentración inicial de 22.41 mg/l a 51,24 mg/l para G2; además muestra que los valores alcanzados de Ca^{+2} en la Figura 4.3 (a) son mayores a los conseguidos en la Figura 4.3 (d), por lo tanto el Ca^{+2} transferido es menor a medida que se incrementa la tasa de aplicación y es mayor a medida que se disminuye el tamaño de partícula.

Comparando los valores de Ca^{+2} finales para los diferentes tamaños de partícula, Figuras 4.3 (b), 4.3 (c) y 4.3 (d) versus 4.3 (a), la cantidad de Ca^{+2} transferido al efluente del lecho empacado es mayor conforme el D_p disminuye lo que es de esperar debido a que granulometrías pequeñas poseen mayor área interfacial y por ende el lecho posee mayor área de contacto con el flujo de agua.

La Figura 4.3a y 4.3b muestra que G2 tiende a incrementar el contenido de Ca^{+2} en el agua con respecto a G1, según Levenspiel (1993) y Urzúa & Caroca (2008) esto se debe a que el efecto de las paredes en el lecho es preponderante porque se forman caminos por las paredes del filtro que provocan que no exista un paso uniforme de agua en el lecho. Sin embargo, a pesar de que el área interfacial de G1 es superior a G2 la superficie real de contacto que se pudo observar para G1 fue menor debido a la formación de cortocircuitos en el lecho empacado, provocando que la transferencia real de Ca^{+2} en G1 sea inferior a la transferencia de G2.

También se observa que los valores alcanzados de Ca^{+2} para las 4 granulometrías alcanzan el valor recomendado por Bueno Zabala (2014), Snoeyink et al. (1987) y Tavanpour et al. (2016) superior a 16 mg de CaCO_3 / l para lograr formar una película protectora de CaCO_3 pero que al ser combinados con los valores de pH y alcalinidad conseguidos en la experimentación solamente se logró llegar a estabilizar químicamente al agua con G2 y Q1.

FIGURA 4.3 VARIACIÓN DE Ca²⁺ PARA CADA TASA DE APLICACIÓN
 (a) Q1, (b) Q2, (c) Q3, (d) Q4



Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

4.5.4 ÍNDICE DE SATURACIÓN DE LANGELIER

En el inciso 2.4.1.1 se definió que el índice de Langelier, (IL) muestra la condición de saturación del agua con respecto al CaCO_3 , (Bueno Zabala, 2014; Casey, 2009; De Sousa et al., 2010; Letterman, 2001; Tavanpour et al., 2016; Trujillo et al., 2008). Si el valor es positivo, entre 0 y 0,5 indica que el agua tiene carácter ligeramente incrustante permitiéndole formar una capa de CaCO_3 en los sistemas de conducción.

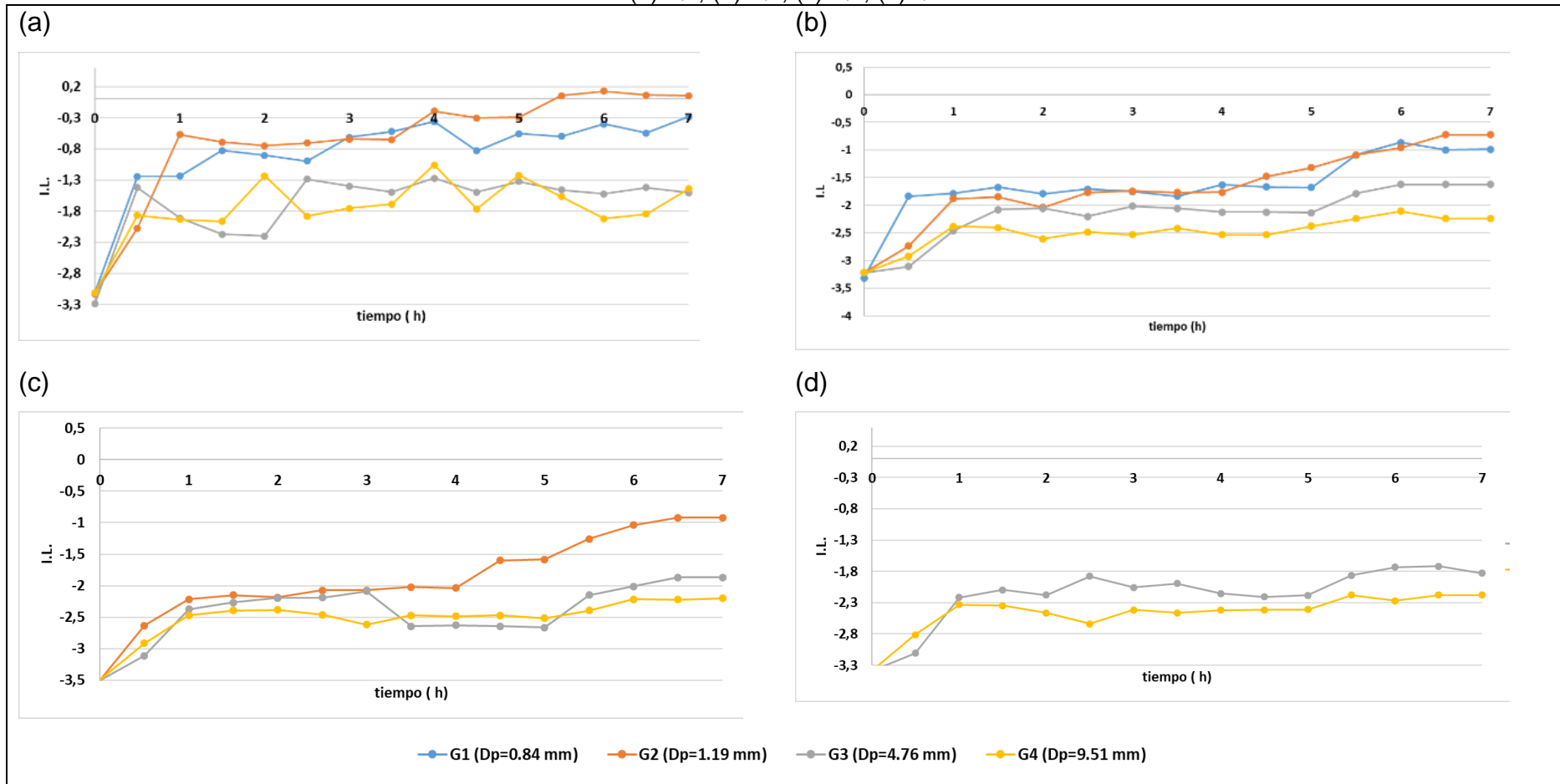
La Figura 4.4(a) indica el incremento del IL a lo largo del tiempo de experimentación, resultando que solamente G2 cumple con el propósito de estabilizar el agua corrosiva, llegando a un $\text{IL} = 0,13$, alcanzando así el objetivo de esta investigación.

Pese a que los valores de pH, alcalinidad y Ca^{2+} para las demás condiciones de experimentación también incrementan el I.L., el agua no logró alcanzar una condición de estabilización lo que indica que se necesitaría un tiempo de contacto mayor al experimentado para que se llegue al estado de sobresaturación con respecto al CaCO_3 .

La Figura 4.4 (a) para G1 indica que el agua de esta condición de experimentación muestra un estado ligeramente incrustante ya que presenta valores que oscilan entre -0,5 y -0,29, en contraste a las situaciones representadas de G3 y G4 que para todas las condiciones de experimentación presentan siempre carácter corrosivo, I.L. menores a -0,5,

El I.L. permite monitorear fluctuaciones relacionadas a factores externos a lo largo del período de experimentación tal como muestra la Figura 4.4 (a), (b), (c) y (d) y además permite visualizar si el proceso de estabilización se mantiene constante a lo largo del período de experimentación. Según Casey (2009) y Tavanpour et al. (2016), se debe tener cuidado con el control de I.L. debido a que con el afán de mantener o llegar alcanzar un I.L. positivo se puede provocar una deposición excesiva del CaCO_3 lo que podría llegar a obstruir las tuberías de la red de distribución de agua potable; por este motivo el I.L. alcanzado es un valor que permite asegurar el control de la corrosión del agua.

FIGURA 4.4 VARIACIÓN DE I.L. PARA CADA TASA DE APLICACIÓN.
 (a) Q1, (b) Q2, (c) Q3, (d) Q4



Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

4.5.5 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA

El coeficiente de transferencia de masa " K_L " fue obtenido a partir de los valores de concentración de calcio experimentales y los de equilibrio teóricos calculados a través del modelo cinético de Castro (1992).

Los valores de K_L para cada granulometría y tasa de aplicación se presentan en la Tabla 4.8; y en el Anexo 6 se presenta un ejemplo de cálculo.

A partir de los valores de K_L obtenidos se puede observar que estos son bajos lo que indica una baja difusividad del Ca^{+2} en el agua, por lo tanto, se puede decir que el proceso no se realiza con facilidad; a pesar que los valores de G3 y G4 son superiores a los de G1 y G2 esta condición no fue suficiente para alcanzar la estabilización del agua debido a que su área interfacial es significativamente menor y por ende no permitirá estabilizar el agua corrosiva.

TABLA 4.8 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA PARA CADA GRANULOMETRÍA Y TASA DE APLICACIÓN

		Q1	Q2	Q3	Q4
K_L (kg/m²h)	G1	0,237	0,385	-	-
	G2	0,879	0,660	0,291	-
	G3	1,084	1,380	0,986	0,977
	G4	0,680	1,160	1,365	0,787

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

Con el objetivo de analizar qué granulometría presenta un mayor rendimiento en el proceso de estabilización la Tabla 4.9 muestra los valores de $K_L a$ para cada ensayo, valores que permiten analizar que condición de experimentación logró una mayor transferencia de masa sin tomar en cuenta el valor del área interfacial "a", ya que este valor difiere para cada condición de experimentación debido a que "a" es inversamente proporcional al tamaño de partícula.

TABLA 4.9 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA K_La PARA CADA GRANULOMETRÍA Y TASA DE APLICACIÓN

		Q1	Q2	Q3	Q4
K_La (kg/m²h/m³)	G1	3522,453	5710,940	-	-
	G2	8332,32	6254,966	2757,088	-
	G3	2261,923	2879,488	2058,662	2038,779
	G4	682,142	1163,121	1368,482	788,919

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

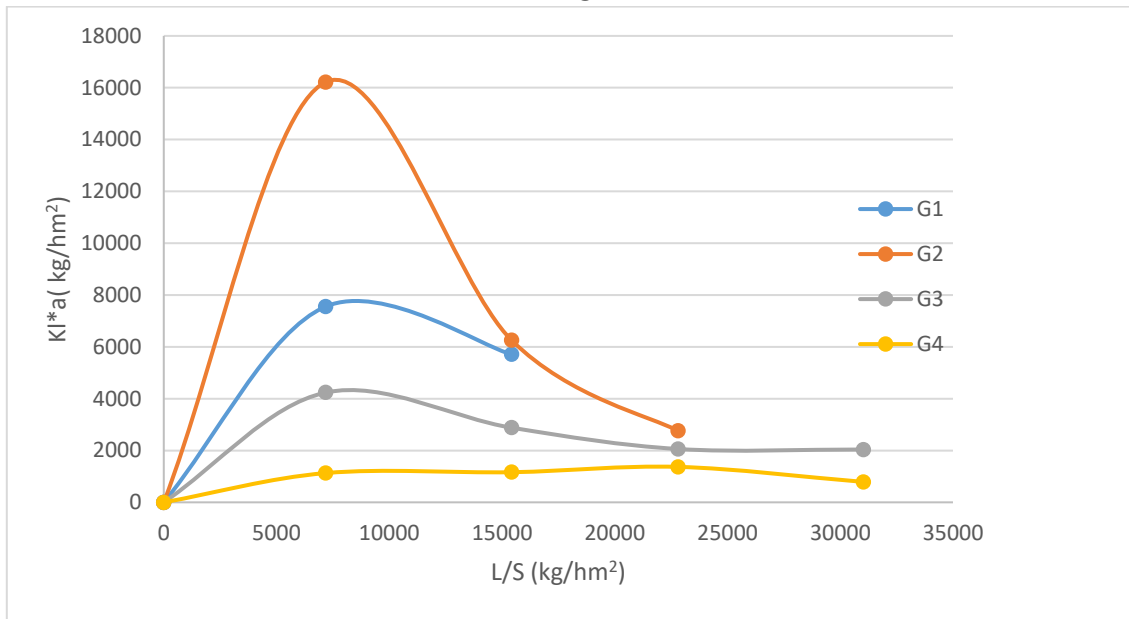
La Tabla 4.9 muestra los valores de K_La de Ca^{+2} transferidos para lograr la estabilización química del agua sintética; el valor de " K_La " para G2 y una tasa de aplicación Q1 corroboran que esta condición de experimentación obtuvo una mayor transferencia de Ca^{+2} y en consecuencia se logró obtener un I.L positivo.

Además los valores de la Tabla 4.9 muestran que existe una marcada disminución en la transferencia de masa al incrementar la tasa de aplicación del fluido ya que según Perry et al. (2001) el K_La representa la velocidad con la que se transfiere la masa en la interfase sólido líquido que es inversamente proporcional a la tasa de aplicación del fluido sobre el lecho empacado.

A partir de los datos de la Tabla 4.4 se construyó la Figura 4.5 que según McCabe et al. (2007) y Perry et al. (2001) permite apreciar que condición de experimentación presenta la mayor eficiencia de operación en términos de transferencia de masa en un lecho empacado.

Cussler (2009a) y Perry et al. (2001) mencionan que en la gráfica ($K_La - L/S$) la granulometría de experimentación que presente un K_La mayor para una misma tasa de aplicación (L/S) será la que obtenga una mayor eficiencia de operación, por lo tanto se puede apreciar que G2 con Q1 de experimentación es la que presenta mayor eficiencia de operación.

FIGURA 4.5 EFICIENCIA DE OPERACIÓN EN TÉRMINOS DE TRANSFERENCIA DE MASA



Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

4.6 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA TRATADA

Con las condiciones de experimentación que lograron estabilizar el agua sintética corrosiva presentados en la Tabla 4.10, se realizó la experimentación con el agua subterránea del pozo de la Cooperativa de Vivienda Nueva Aurora ubicada en Santo Domingo de los Tsáchilas.

TABLA 4.10 CONDICIONES DE OPERACIÓN QUE LOGRARON LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA CON AGUA SINTÉTICA

Tasa de aplicación	$Q_1 = 0,094 \text{ L/min}$
Área de transversal de la columna	$S = 7,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Velocidad de aplicación	$u_o = 1,98 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
Altura del lecho empacado	$L = 0,40 \text{ m}$
Diámetro interno de la columna	$D_c = 0,0375 \text{ m}$
Diámetro de partícula	$D_p = 1,18 \text{ mm}$

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

La Tabla 4.11 presenta los datos experimentales registrados y el pH de saturación e Índice de Langelier calculado para esta condición.

TABLA 4.11 DATOS EXPERIMENTALES PARA EL AGUA SUBTERRÁNEA COOPERATIVA NUEVA AURORA, 2017

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T (°C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Calcio (mg Ca ²⁺ /l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
1	0	6,2	17,00	40,795	25,62	157,3	8,468	-2,27
2	0,5	6,7	17,20	51,740	45,53	189,475	8,120	-1,42
3	1	6,9	17,00	51,641	43,91	190,4045	8,137	-1,24
4	1,5	7,1	16,90	51,243	45,53	192,1205	8,125	-1,02
5	2	7,2	17,00	51,740	45,53	188,903	8,120	-0,92
6	2,5	6,9	17,10	51,740	45,37	189,6895	8,122	-1,22
7	3	6,95	17,10	51,342	46,35	190,047	8,116	-1,17
8	3,5	6,96	17,10	50,745	44,72	189,6895	8,137	-1,18
9	4	6,98	17,20	51,840	45,53	189,4035	8,120	-1,14
10	4,5	7,05	17,10	50,745	45,70	192,1205	8,128	-1,08
11	5	7,1	17,00	51,641	44,72	191,763	8,129	-1,03
12	5,5	7,15	17,00	51,243	44,72	191,5485	8,133	-0,98
13	6	7,12	17,00	51,740	45,37	191,763	8,122	-1,00
14	6,5	7,12	17,00	51,243	44,72	191,477	8,133	-1,01
15	7	7,15	17,10	51,740	44,72	191,906	8,129	-0,98

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

Los datos de la Tabla 4.11 indican que después de un periodo de experimentación igual al realizado con el agua sintética no se logró estabilizar el agua subterránea ya que se alcanzó un I.L. = -0,98 que indica que el agua todavía tiene un carácter ligeramente corrosivo y no logró estabilizarse completamente debido a un incremento en las concentraciones de hierro en el agua las cuales actúan como inhibidores en el proceso de estabilización química.

Hay que recalcar que el muestreo inicial realizado para la selección del agua subterránea se llevó a cabo en una época diferente del año con respecto a la fecha de experimentación final, tal como muestran los valores de la Tabla 4.12 el hierro fue de 2,13 mg/l mientras que para la experimentación final las aguas del mismo pozo tuvieron valores de 6,25 mg/l.

TABLA 4.12 RESULTADOS DEL MUESTREO EN LA COOPERATIVA NUEVA AURORA

Parámetro	Unidad	Primer muestreo	Segundo muestreo
pH	-	6,53	6,2
Temperatura	°C	20	20
TDS	mg/l	175	157,3
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /l	49,75	40,95
Calcio	mg Ca ⁺² /l	26,01	25,62
Hierro Total	mg/l	2,2	6,95
Hierro Soluble	mg/l	2,13	6,60

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

A pesar que esta técnica puede ser utilizada en la neutralización del drenado de aguas ácidas de minas, según Brăhăita et al. (2017), la utilización de CaCO₃ permite aumentar el pH del agua más no estabilizarlas químicamente, además Gude (2010) indica que la presencia de iones tales como el Mg⁺² y el Fe⁺² son inhibidores de la estabilización química de aguas en los procesos donde ese utiliza lechos empacados de CaCO₃ debido a que el Fe⁺² al oxidarse a Fe⁺³ precipita sobre el material de empaque y anulan la transferencia de masa para estabilización.

Es por esto que se puede apreciar en la Tabla 4.11 que el paso del agua subterránea por el lecho aumenta los valores de pH y las concentraciones de alcalinidad, Ca⁺² y TDS, pero la presencia de los iones inhibidores no permite la estabilización del agua en el lecho, además Gude (2010) menciona que la disolución del CaCO₃ se da en la superficie de la piedra y con la presencia de iones ajenos se puede formar una capa que impida la correcta transferencia de CaCO₃ hacia el agua.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5,1 CONCLUSIONES

- Se determinó que el porcentaje de pureza del mármol granular comercializado por la empresa LA ROCA S.A. es mayor a 95,56%, lo que indica que las impurezas son mínimas y este puede ser utilizado como material de empaque en lechos de contacto para la estabilización química de aguas corrosivas.
- La acidificación del agua potable para el ensayo del proceso de estabilización con HNO_3 y manteniendo el sistema cerrado a la atmósfera logró ser efectiva ya que se comprobó que las condiciones iniciales del agua de abastecimiento no variaron significativamente a lo largo de la fase de experimentación. El agua sintética preparada en laboratorio con un I.L.=-3,13 llegó a la condición de estabilización química en un periodo de 6 horas resultando un I.L.= 0,13 con un $D_p = 1,18$ mm y una tasa de aplicación de 0,094 L/min.
- El coeficiente de transferencia de masa K_L obtenido para la condición de estabilización química fue de $K_L=0,879$ Kg/h.m², parámetro requerido para el dimensionamiento a escala industrial del proceso con lechos empacados de diámetro de partícula de 1,19 mm. La relación que existe entre la tasa de aplicación y granulometría con la transferencia de masa en el proceso fue que a medida que se incrementa la tasa de aplicación, la masa transferida disminuye debido a que a mayor granulometría disminuye el área interfacial del material en contacto con el fluido.
- Esta técnica puede ser utilizada en el país en lugares donde la única fuente de abastecimiento de agua sean fuentes de aguas subterráneas que no requieran un tratamiento adicional, de ser necesario un tratamiento, esta técnica debe utilizarse al final del proceso de tratamiento después de la remoción de hierro y desinfección.

- La estabilización química de las aguas de la cooperativa Nueva Aurora no se logró completamente debido a la presencia de altas concentraciones de Fe^{2+} = 6,95 mg/l el cual al oxidarse puede precipitar sobre el material de empaque inhibiendo el proceso de estabilización. Pese a la existencia de Fe^{2+} el IL obtenido para las aguas subterráneas fue de -0,98 valor que indica que la estabilización puede lograrse sometiendo el agua a un proceso de aireación para la oxidación del hierro soluble a Fe^{3+} que es precipitable y seguidamente como hierro coloidal por lo que se requiere de proceso de coagulación-floculación y sedimentación y como proceso final la estabilización química propuesta en este estudio.
- Debido a que el tiempo de retención fue corto para cada tasa de aplicación se tuvo que realizar muestreos cada 30 minutos para asegurar que el flujo inunde todo el lecho y por lo tanto que esté en contacto con toda el área superficial disponible y además se corroboró experimentalmente que tanto en G1 y G2 se formaron siempre para cada condición de experimentación una película de agua de altura constante que aseguraba que el fluido entre en contacto con toda la superficie interfacial del lecho; es por esto que estas condiciones de experimentación mostraron I.L. en un rango de -0,5 y 0,5.

5,2 RECOMENDACIONES

- Realizar la experimentación con tasas de aplicación menores a las realizadas en esta investigación para las granulometrías G1 y G2, para evitar caídas de presión y analizar el comportamiento de diámetros de partícula más pequeños en el proceso de estabilización química.
- Efectuar un estudio del comportamiento del material de empaque a flujo continuo durante un periodo de experimentación más extenso, para poder determinar el tiempo de vida útil del material de empaque.
- Realizar la experimentación en un sistema abierto a la atmósfera, para analizar la incidencia del CO₂ en el comportamiento del sistema carbonatos.
- Realizar el análisis de alcalinidad con un potenciómetro más sofisticado que evite la incidencia del CO₂ en la muestra.
- Realizar un estudio de los lechos de CaCO₃ para neutralización de aguas industriales de carácter ácido como por ejemplo industrias cervecera y azucarera las cuales presentan características ácidas en sus efluentes y evaluar su eficiencia de funcionamiento.
- Aplicar un software que permita un manejo sencillo de datos para calcular la tendencia corrosiva de aguas subterráneas.
- Utilizar bombas peristálticas en el diseño del sistema experimental para asegurar que la tasa de aplicación hidráulica sea constante.

BIBLIOGRAFÍA

- Alex Pauta Novillo;Diego Quezada Sisalima. (2017). *“Determinación de la tendencia corrosiva e incrustante del agua potable distribuida en la ciudad de Azogues.* Universidad de cuenca. Recuperado de:
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/26993/1/Tesis.pdf>
- AWWA. (2002). *Finished Water Storage Facilities.* Recuperado de:
https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2007_05_18_disinfection_tcr_whitepaper_tcr_storage.pdf
- AWWA. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* American Water Works Association. Recuperado de:
<https://www.awwa.org/store/productdetail.aspx?productid=28493774>
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1975). *Fenómenos de Transporte.*
- Brăhăita, I. D., Pop, I. C., Baciú, C., Mihăiescu, R., MODOI, C., Popita, G., & Truță, R. M. (2017). The efficiency of limestone in neutralizing acid mine drainage – a laboratory study. *347 Carpathian Journal of Earth and Environmental Science*, 12, 347–356. Recuperado de: https://scihub.hk/https://www.researchgate.net/publication/312586962_the_efficiency_of_limestone_in_neutralizing_acid_mine_drainage_-_a_laboratory_study
- Bueno Zabala, K. A. (2014). *Evaluación del proceso de estabilización del pH del agua tratada del Río Cauca.* Universidad del valle.Recuperado de:
<http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7650/1/7720-0446364.pdf>
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2015). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador*, 128.Recuperado de:
<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/promotion/inamhi-monitorea-las-24-horas-del-dia-este-parametro/>
- Campos, A., Sinichenko, E., & Gritsuk, I. (2014). *Disponibilidad de los recursos hídricos en el Ecuador, 2014.*Recuperado de:
https://www.academia.edu/8618821/Disponibilidad_de_agua_en_Ecuador_2014
- Carl R. Branan. (2011). *Rules of Thumb for Chemical Engineers* (4th ed.). Elsevier Inc.Recuperado de:
[http://elearning.unsri.ac.id/pluginfile.php/17363/mod_resource/content/1/RULES OF THUMBS OF CHEM-ENG.pdf](http://elearning.unsri.ac.id/pluginfile.php/17363/mod_resource/content/1/RULES_OF_THUMBS_OF_CHEM-ENG.pdf)

- Casey, T. J. (2009). Water stabilisation and corrosion control drinking water stabilisation and corrosion control. Recuperado de: <http://www.aquavarra.ie/stable.pdf>
- Castro, F. (1992). *Modelo Cinético para el diseño de lechos de contacto para la estabilización química del agua*. Escuela Politécnica Nacional.
- CEPAL. (2011). Diagnóstico de la estadísticas del agua en Ecuador. *Diagnostico de La Informacion Estadística Del Agua*, 81. Recuperado de: <http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico de las Estadísticas del Agua Producto Ilc 2012-2.pdf>
- Cussler, E. L. (2009a). *Diffusion: mass transfer in fluid systems* (3rd edition). Cambridge University Press.
- Cussler, E. L. (2009b). *Diffusion: mass transfer in fluid systems* (3rd edition). Cambridge University Press.
- De Sousa, C., Correia, A., & Colmenares, M. C. (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(2), 187–196.
- Flores, C. (2006). *Filtración Combinada Anaerobia*. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/753/florestores.pdf?sequence=11>
- Geankopolis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (3rd ed.).
- Gude, J. (2010). *Conditioning of aggressive water*. Delft University of Technology. Recuperado de: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:934d99e5-526e-4067-bdd2-7982d406d75c/datastream/OBJ>
- IAEA. (2016). Proyecto Arcal CXXXV, mejora del conocimiento de aguas subterráneas. Recuperado de: <http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/07/EPMAPS-Proyecto-RLA-0718.pdf>
- INAMHI. (2014). *Anuario Meteorológico* (No. 51–2011). Quito, Ecuador.
- INEC. (2013). *Censo de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales 2013*. Recuperado de: http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_ConsProvinciales_2013/Municipios-

- 2013/Presentacion_Principales_Resultados_Municipios.pdf
- INEN. (2014). *NTE INEN-ISO 8316 medida del caudal de líquidos en conductos cerrados. Método por recogida de líquido en un tanque volumétrico (ISO 8316:1987, IDT)*. Quito. Recuperado de: http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/EXTRACTO_2014/VGR/nte_inen_iso_8316extracto.pdf
- Letterman, R. D. (2001). *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies. Environmental Protection* (Vol. 331). Recuperado de: <http://uclibs.org/PID/106321>
- Levenspiel, O. (1993). *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. Reverté. Recuperado de: <https://www.casadellibro.com/libro-flujo-de-fluidos-e--intercambio-de-calor/9788429179682/377471>
- Loewenthal, R. E., Morrison, I., & Wentzel, M. C. (2004). Control of corrosion and aggression in drinking water systems. *Water Science and Technology*, 49(2), 9–18.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriot, P., & Piombo Herrera, A. C. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. McGraw-Hill Interamericana. Recuperado de: <https://www.casadellibro.com/libro-operaciones-unitarias-en-ingenieria-quimica/9789701061749/1142828>
- Merrill, D. T., & Sanks, R. (1977). Corrosion Control by Deposition of CaCO₃ Films : Part 1 , A Practical Approach for Plant Operators, 69(11), 592–599.
- Moisés, C., Panameño, B., Graciela, C., Benavides, O., Esmeralda, H., & Colato, S. (2010). *Diseño, construcción y pruebas de funcionamiento de un lecho empacado para laboratorios de flujo de fluidos*. Universidad de El Salvador. Recuperado de: http://ri.ues.edu.sv/2003/1/Diseño%2C_construcción_y_pruebas_de_funcionamiento_de_un_lecho_empacado_para_laboratorios_de_flujo_de_fluidos.pdf
- Mora Arellano, V., & Cedeño, J. L. (2006). Evaluación de corrosión e incrustaciones en instalaciones hidráulicas de una planta de potabilización en el estado Bolívar, Venezuela. *Boletín de Malariología Y Salud Ambiental*, 46(1), 67–78. Recuperado de: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1690-46482006000100008
- Padilla, D. (2013a). *Determinación del Coeficiente de transferencia de masa en torres de enfriamiento*. Instituto Tecnológico de Sonora. Recuperado de: http://biblioteca.itson.mx/dac_new/tesis/749_padilla_dulce.pdf

- Padilla, D. (2013b). *Determinación del Coeficiente de transferencia de masa en torres de enfriamiento*. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Perry, R. R., Green, D. W., & Maloney, J. (2001). *Manual del ingeniero químico* (7a edición). McGraw-Hill. Recuperado de:
http://www.ingebook.com/ib/NPcd/IB_BooksVis?cod_primaria=1000187&codigo_libro=6572
- Ponce, B. M., & Gambaudo, S. (2005). *Minerales para la agricultura en Iberoamérica*. Buenos Aires. Recuperado de:
<http://www.unsam.edu.ar/publicaciones/tapas/cyted/parte4.pdf>
- Pujos, M. L. (2015, November 23). *Diseño de un sistema de fluidización por lotes para granos a escala de planta piloto*. Quito, 2015. Recuperado de:
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/12030>
- Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del agua. (2003). Tecnología informática para evaluar.
- Rivera, N. E. (2015). Caída de presión en lecho empacado. Mexicali: Instituto Tecnológico de Mexicali.
- Sallanko, J., Hietala, J., Lindström, R., Kytövaara, A., & Väisänen, T. (2013). More efficient alkalisation with ground limestone in groundwater treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 62(3), 183.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2013.025>
- Snoeyink, V. L., Jenkins, D., & Sanginés Franchini, M. C. (1987). *Química del agua*. Editorial Limusa. Recuperado de:
https://books.google.com.ec/books/about/Química_del_agua.html?id=VY33PQAACAAJ&redir_esc=y
- Sousa, C. De, Colmenares, M., & Correia, A. (2008). Contaminación bacteriológica en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. *Bol. Mal. Salud Amb*, XLVIII(1), 17–26. Recuperado de:
http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1690-46482008000100002
- Tavanpour, N., Noshadi, M., & Tavanpour, N. (2016). Scale Formation and Corrosion of Drinking Water Pipes: A Case Study of Drinking Water Distribution System of Shiraz City. *Modern Applied Science*, 10(3), 166.
<https://doi.org/10.5539/mas.v10n3p166>
- Torres Herrera, F. (1972). *Obras hidráulicas*. México. Recuperado de:

<http://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=38458>

Trujillo, E., Martínez, V., & Flores, N. S. (2008). Ajuste del equilibrio químico del agua potable con tendencia corrosiva por dióxido de carbono. *Información Tecnológica*, 19(6), 89–101. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.3967it.07>

Urzúa, P. A. W., & Caroca, F. G. (2008). *Modelo Físico Predictivo De La Fluidodinámica De Lecho Empacado Para Conversión Continua De Cobre. Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento De Ingeniería Química Y Biotecnología*. Recuperado de:

http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/urzua_pg/sources/urzua_pg.pdf

Zamora Martínez, O., & Colín, A. S. (2014). Determinación del contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) en una muestra comercial. In *Manual de prácticas de laboratorio de fisicoquímica UNAM México*. México. Recuperado de: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/DeterminacionDelContenidoDeCaCO3_33096.pdf

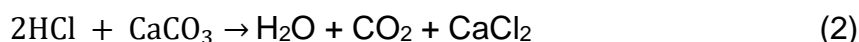
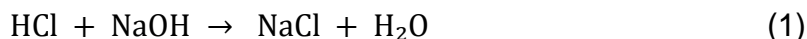
ANEXO N°1**EJEMPLO DE CÁLCULO DEL % DE PUREZA DE LA
MUESTRA COMERCIAL DE CaCO_3**

TABLA A1. 1 DATOS EXPERIMENTALES PARA DETERMINACIÓN DEL % DE PUREZA DEL CaCO_3

Muestra	Peso CaCO_3 (g)	Volumen HCl (ml)	Volumen gastado NaOH(ml)	Moles totales HCL	Moles HCl neutralizadas con NaOH	Moles HCl reaccionan con CaCO_3	Peso de CaCO_3 real (g)	% de pureza de CaCO_3	
la Roca	0,1501	35	6,3	0,0035	$6,12 \times 10^{-4}$	0,0028	0,1437	95,710	95,559
	0,1504	35	6,5	0,0035	$6,32 \times 10^{-4}$	0,0028	0,1427	94,867	
	0,1500	35	6,2	0,0035	$6,03 \times 10^{-4}$	0,0029	0,1442	96,101	
Discal	0,1500	35	6,8	0,0035	$6,61 \times 10^{-4}$	0,0028	0,1412	94,139	93,863
	0,1502	35	7	0,0035	$6,80 \times 10^{-4}$	0,0028	0,1402	93,360	
	0,1506	35	6,7	0,0035	$6,51 \times 10^{-4}$	0,0028	0,1417	94,089	

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

Las ecuaciones presentadas representan las reacciones producidas en la titulación de la muestra comercial.



Concentración HCl estandarizado:

$$[\text{HCL}] = 0,099 \text{ mol/l}$$

Concentración NaOH estandarizado:

$$[\text{NaOH}] = 0,097 \text{ mol/l}$$

Masa pesada de mármol:

$$m \text{ CaCO}_3 = 0,1501 \text{ g}$$

Volumen de HCl utilizado para disolver la muestra

$$V_{\text{total HCl}} = 35 \text{ ml}$$

Por lo tanto moles iniciales totales de HCl:

$$n_{o \text{ total HCl}} = 0,099 \frac{\text{mol}}{\text{l}} * 35\text{ml} * \frac{\text{L}}{1000\text{ml}}$$

$$n_{\text{HCl}} = 0,0035 \text{ mol HCl}$$

Volumen gastado de NaOH en la titulación:

$$V_{\text{NaOH}} = 6.3 \text{ ml}$$

Moles de HCl neutralizadas con NaOH a partir de reacción 1.

$$n_{HCl} = 6.3 \text{ mL NaOH} * \frac{0,097 \text{ mol NaOH}}{1000 \text{ mL NaOH}} * \frac{1 \text{ mol HCl}}{1 \text{ mol NaOH}}$$

$$n_{NaOH} = 6.12 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

Estequiométricamente en la reacción 1

n_{HCl} neutralizadas con NaOH = n_{HCl} que no reaccionaron con el CaCO_3

n_{HCl} reaccionaron con el $\text{CaCO}_3 = n_{\text{total HCl}} - n_{HCl}$ no reaccionaron con CaCO_3

n_{HCl} reaccionaron con el $\text{CaCO}_3 = 0,0035 \text{ mol} - 6.12 \times 10^{-4} \text{ mol} = 0,002845 \text{ mol}$

A partir de la reacción 2 se obtiene la masa de CaCO_3 real que reaccionó en la muestra analizada

$$m_{\text{real CaCO}_3} = 0,002845 \text{ mol HCl} \cdot \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{2 \text{ mol HCl}} \cdot \frac{100,96 \text{ g CaCO}_3}{1 \text{ mol CaCO}_3}$$

$$m_{\text{real CaCO}_3} = 0,144 \text{ g}$$

$$\% \text{ pureza CaCO}_3 = \frac{m_{\text{real CaCO}_3 \text{ que reaccionó}}}{m_{\text{comercial pesada de CaCO}_3}} * 100 = \frac{0,144}{0,1501} * 100 = 95,71\%$$

ANEXO N.º 2

**EJEMPLO DE CÁLCULO DE D_p , DENSIDAD Y POROSIDAD
PARA GRANULOMETRÍA UTILIZANDO EL MÉTODO DEL
VOLUMEN DESPLAZADO**

- Dp

Los datos obtenidos a partir de la metodología expuesta en la sección 3.2.2 se presentan en la Tabla A2.1.

TABLA A2. 1 Dp OBTENIDOS PARA CADA GRANULOMETRIA UTILIZANDO EL METODO DEL VOLUMEN DESPLAZADO

Granulometría	VH ₂ O medido (ml)	Número granos añadidos	V luego de la adición de los granos (mL)	Δ Volumen en la probeta	Dp _{eq esf} (mm)	Dp (mm)	Dp prom
G1	10	100	10,15	0,15	1,420	0,852	0,851
	10	100	10,17	0,17	1,481	0,888	
	10	100	10,13	0,13	1,354	0,812	
G2	10	100	10,4	0,4	1,969	1,182	1,182
	10	100	10,4	0,4	1,969	1,182	
	10	100	10,4	0,4	1,969	1,182	
G3	10	30	17,5	7,5	7,816	4,690	4,69
	10	30	17,3	7,3	7,746	4,647	
	10	30	17,7	7,7	7,885	4,731	
G4	50	20	92	42	15,888	9,533	9,531
	50	20	90	40	15,632	9,379	
	50	20	94	44	16,136	9,682	

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- Ejemplo de cálculo para la obtención del Dp para G1 utilizando las ecuaciones 2.24 y 2.25

$$D_{eq\ esf} = \left(\frac{6V}{n\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (0.1)$$

$$D_{eq\ esf} = \left(\frac{6 * 0,15\text{ml} * \frac{\text{cm}^3}{\text{ml}}}{100 * \pi} \right)^{\frac{1}{3}} * \frac{10\ \text{mm}}{1\ \text{cm}}$$

$$D_{eq\ esf} = 1.420\ \text{mm}$$

Con el valor calculado de $D_{eq\ esf}$ y utilizando el valor de esfericidad 0,6 tomado de la Tabla 2.10 se calculó el D_p utilizando la ecuación 2.25

$$D_p = D_{eq\ esf} * \phi \quad (0.2)$$

$$D_p = 1.420\ \text{mm} * 0,6$$

$$D_p = 0,852\ \text{mm}$$

- **Porosidad y densidad**

La Tabla A2.2 presenta los valores experimentales de densidad y porosidad luego de aplicar la metodología de la sección 3.3.3; se realizaron 3 repeticiones del procedimiento para obtener datos confiables.

TABLA A2. 2 VALORES EXPERIMENTALES PARA EL CÁLCULO DE LA POROSIDAD Y DENSIDAD

	V total (ml)	V agua (ml)	V húmedo (ml)	w (g)	ε	ε prom	p _a (g/ml)	p _r (g/ml)	p _r prom (g/ml)
G1	6	4	7,40	7,7224	0,433	0,434	1,287	2,276	2,276
	6	4	7,39	7,7220	0,435		1,287	2,276	
	6	4	7,39	7,7221	0,435		1,287	2,276	
G2	6	4	7,20	7,1189	0,467	0,466	1,186	2,222	2,222
	6	4	7,20	7,1188	0,467		1,186	2,222	
	6	4	7,21	7,1191	0,465		1,187	2,222	
G3	30	25	40,00	39,4323	0,500	0,494	1,314	2,600	2,600
	30	25	40,50	39,4324	0,483		1,314	2,600	
	30	25	40,00	39,4320	0,500		1,314	2,600	
G4	50	40	65,00	68,2530	0,500	0,507	1,365	2,767	2,767
	50	40	64,50	68,2528	0,510		1,365	2,767	
	50	40	64,50	68,2529	0,510		1,365	2,767	

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- Ejemplo de cálculo para la determinación de la porosidad de G2 utilizando la ecuación 2.27

V total = 6 ml

V agua = 4 ml

V húmedo = 7.20 ml

$$\epsilon = \frac{(V_{total} + V_{H_2O}) - V_{lecho\ húmedo}}{V_{total}} \quad (2.27)$$

$$\epsilon = \frac{(6 + 4) - 7.2}{6} = 0,467$$

- Ejemplo de cálculo para la determinación de la densidad de G2 utilizando las ecuaciones 2.29 y 2.30

w = 7.118 g

V total = 6 ml

$\epsilon = 0,466$

$$p_a = \frac{w}{V_{total}} \quad (2.29)$$

$$p_a = \frac{7.118 \text{ g}}{6 \text{ ml}}$$

$$p_a = 1.186 \text{ g/ml}$$

Con el valor de p_a se determina finalmente la densidad real p_r

$$p_r = \frac{p_a}{1 - \epsilon} \quad (2.30)$$

$$p_r = \frac{1.186}{1 - 0,466}$$

$$p_r = 2.22 \text{ g/ml}$$

ANEXO N°3

**AFORO VOLUMÉTRICO REALIZADO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS
TASAS DE APLICACIÓN**

- Aforos volumétricos realizados en probeta de 10 ml para la obtención de Q1

TABLA A3. 1 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G1

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	6,2	0,097
2	6,59	0,091
3	6,44	0,093
4	6,32	0,095
5	6,12	0,098
	Q prom	0,095

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 2 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G2

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	6,58	0,091
2	6,58	0,091
3	6,32	0,095
4	6,32	0,095
5	6,26	0,096
	Q prom	0,094

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 3 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G3

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	6,07	0,099
2	6,21	0,097
3	6,46	0,093

4	6,26	0,096
5	6,84	0,088
	Q prom	0,094

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 4 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G4

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	6,4	0,094
2	6,32	0,095
3	6,53	0,092
4	6,85	0,088
5	6,27	0,096
	Q prom	0,093

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- **Aforos volumétricos realizados en probeta de 25 mL para la obtención del caudal de experimentación Q2 para cada lecho.**

TABLA A3. 5 AFORO VOLUMÉTRICO G1

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	7,5	0,200
2	7,44	0,202
3	7,6	0,197
4	7,66	0,196
5	7,45	0,201
	Q prom	0,199

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 6 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G2

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	7,41	0,202
2	7,41	0,202
3	7,47	0,201
4	7,56	0,198
5	7,02	0,214
	Q prom	0,204

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 7 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G3

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	7,51	0,200
2	7,61	0,197
3	7,55	0,199
4	7,48	0,201
5	7,51	0,200
	Q prom	0,199

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 8 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G4

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	7,34	0,204
2	7,54	0,199
3	7,28	0,206
4	7,47	0,201
5	7,61	0,197
	Q prom	0,201

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- Aforos volumétricos realizados en probeta de 25 ml para la obtención del caudal de experimentación Q3 para cada lecho.

TABLA A3. 9 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G1

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	4,92	0,305
2	5,06	0,296
3	4,98	0,301
4	4,98	0,301
5	4,99	0,301
	Q prom	0,301

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 10 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G2

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	4,92	0,305
2	5,01	0,299
3	4,98	0,301
4	4,98	0,301
5	5,03	0,298
	Q prom	0,301

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 11 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G3

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	4,94	0,304
2	4,91	0,305
3	5,06	0,296

4	5,07	0,296
5	4,97	0,302
	Q prom	0,301

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 12 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G4

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	4,99	0,301
2	4,99	0,301
3	5,06	0,296
4	4,99	0,301
5	5,05	0,297
	Q prom	0,299

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- Aforos volumétricos realizados en probeta de 25 ml para la obtención del caudal de experimentación Q4 para cada lecho.

TABLA A3. 13 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G1

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	1,51	0,397
2	1,48	0,405
3	1,5	0,400
4	1,48	0,405
5	1,42	0,423
	Q prom	0,406

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 14 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G2

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	1,52	0,395

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
2	1,44	0,417
3	1,49	0,403
4	1,49	0,403
5	1,48	0,405
	Q prom	0,404

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 15 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G3

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	1,52	0,395
2	1,42	0,423
3	1,48	0,405
4	1,48	0,405
5	1,57	0,382
	Q prom	0,402

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

TABLA A3. 16 AFORO VOLUMÉTRICO PARA G 4

Aforo	tiempo (s)	Q (l/min)
1	1,49	0,403
2	1,5	0,400
3	1,41	0,426
4	1,45	0,414
5	1,48	0,405
	Q prom	0,409

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

ANEXO N°4

RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN PARA CADA TASA DE APLICACIÓN Y G DE EXPERIMENTACIÓN

- TABLA A4. 1 Datos experimentales obtenidos para G1 y Q1

# Muestra	tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,7	17,00	20,00	22,42	127,34	8,83	-3,13
1	0,5	6,87	17,50	63,68	37,40	187,69	8,12	-1,25
2	1	6,89	17,10	52,74	43,91	185,19	8,13	-1,24
3	1,5	7,09	17,00	62,69	60,17	186,76	7,92	-0,83
4	2	7,1	17,20	62,69	48,79	184,47	8,01	-0,91
5	2,5	7,15	17,20	48,76	45,53	181,11	8,14	-0,99
6	3	7,41	16,40	55,72	34,15	0,00	8,12	-0,61
7	3,5	7,49	16,80	58,71	32,52	0,00	8,12	-0,52
8	4	7,51	16,90	50,75	47,16	174,17	8,11	-0,36
9	4,5	7,6	16,70	59,70	32,52	172,53	8,20	-0,83
10	5	7,75	17,00	51,74	40,66	171,60	8,17	-0,56
11	5,5	7,37	17,10	54,73	32,52	170,10	8,24	-0,60
12	6	7,61	17,10	55,72	32,52	169,46	8,23	-0,40
13	6,5	7,64	17,50	49,75	40,66	172,39	8,18	-0,54
14	7	7,83	18,00	56,50	41,70	166,74	8,12	-0,29

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 2 Datos experimentales obtenidos para G2 y Q1

Muestra	Tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,7	17,00	20,00	22,42	127,34	8,83	-3,13
1	0,5	6,47	17,50	48,00	38,43	173,32	8,22	-1,75
2	1	7,55	17,10	54,00	43,23	173,67	8,12	-0,57
3	1,5	7,46	17,00	57,00	38,43	172,89	8,15	-0,69
4	2	7,43	17,20	58,00	35,23	175,82	8,18	-0,75
5	2,5	7,44	17,20	62,00	38,43	175,68	8,11	-0,70
6	3	7,44	16,40	59,00	43,23	174,46	8,08	-0,64
7	3,5	7,41	16,80	60,00	44,84	174,25	8,06	-0,65
8	4	7,77	16,90	68,00	49,64	175,18	7,96	-0,19
9	4,5	7,57	16,70	81,00	51,24	175,32	7,87	-0,30
10	5	7,66	17,00	74,00	46,44	175,75	7,95	-0,29
11	5,5	7,96	17,10	78,00	49,64	179,54	7,90	0,06
12	6	7,97	17,10	82,00	54,44	181,97	7,84	0,13
13	6,5	7,97	17,50	73,00	52,84	178,61	7,90	0,07
14	7	7,98	18,00	72,00	51,24	182,47	7,92	0,06

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 3 Datos experimentales obtenidos para G3 y Q1

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,7	17,0	20,00	22,42	127,34	8,83	-3,13
1	0,5	6,73	17,50	27,86	76,43	132,28	8,15	-1,42
2	1	6,67	17,10	30,85	26,02	136,42	8,58	-1,91
3	1,5	6,34	17,00	35,82	26,02	137,42	8,51	-2,17
4	2	6,37	17,20	27,86	29,27	137,28	8,57	-2,20
5	2,5	7,12	17,20	31,84	37,40	137,71	8,41	-1,29
6	3	7,07	16,40	31,84	32,52	136,71	8,47	-1,40
7	3,5	7,04	16,8	38,81	22,77	135,85	8,54	-1,50
8	4	7,19	16,90	30,85	34,15	134,28	8,46	-1,27
9	4,5	7,01	16,70	30,85	30,90	134,35	8,50	-1,49
10	5	7,13	17,00	29,85	35,78	132,92	8,45	-1,32
11	5,5	6,91	17,10	37,81	34,15	132,92	8,37	-1,46
12	6	7,07	17,10	36,82	21,14	133,35	8,59	-1,52
13	6,5	7,2	17,50	24,88	29,27	132,92	8,62	-1,42
14	7	7,2	18,00	34,83	29,27	132,92	8,47	-1,27

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 4 Datos experimentales obtenidos para G4 y Q1

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,71	17,00	20,00	14,64	119,05	9,01	-3,30
1	0,5	6,73	17,50	27,65	27,65	127,34	8,60	-1,87
2	1	6,4	17,10	37,40	37,40	127,06	8,34	-1,94
3	1,5	6,3	17,00	40,66	40,66	129,49	8,26	-1,96
4	2	6,36	17,20	87,81	87,81	126,91	7,59	-1,23
5	2,5	6,95	17,20	21,14	21,14	127,13	8,83	-1,88
6	3	6,95	16,40	24,39	24,39	126,48	8,71	-1,76
7	3,5	7,08	16,80	22,77	22,77	125,91	8,77	-1,69
8	4	7,24	16,90	39,03	39,03	125,20	8,30	-1,06
9	4,5	7	16,70	22,77	22,77	125,55	8,77	-1,77
10	5	7,11	17,00	37,40	37,40	124,91	8,34	-1,23
11	5,5	7,2	17,10	22,77	22,77	125,13	8,77	-1,57
12	6	6,91	17,10	21,14	21,14	125,48	8,83	-1,92
13	6,5	7,21	17,50	16,26	16,26	125,20	9,06	-1,85
14	7	7,21	18,00	26,02	26,02	124,70	8,65	-1,44

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 5 Datos experimentales obtenidos para G1 y Q2

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,9	17,00	11,36	20,24	127,34	9,12	-3,22
1	0,5	6,58	17,50	38,73	30,55	187,69	8,42	-1,84
2	1	6,62	17,10	39,24	31,13	185,19	8,40	-1,78
3	1,5	6,72	17,00	41,32	30,35	186,76	8,39	-1,67
4	2	6,62	17,20	39,24	30,74	184,47	8,41	-1,79
5	2,5	6,7	17,20	39,24	30,80	181,11	8,41	-1,71
6	3	6,68	16,40	38,73	29,57	179,75	8,43	-1,75
7	3,5	6,8	16,80	25,82	27,65	174,25	8,64	-1,84
8	4	6,95	16,90	27,88	29,27	174,17	8,58	-1,63
9	4,5	6,9	16,70	26,85	30,90	172,53	8,57	-1,67
10	5	6,9	17,00	26,33	30,90	171,60	8,58	-1,68
11	5,5	7,1	17,10	64,03	31,06	170,10	8,19	-1,09
12	6	7,3	17,10	69,19	30,74	169,46	8,16	-0,86
13	6,5	7,2	17,50	66,09	29,43	172,39	8,20	-1,00
14	7	7,2	18,00	66,09	30,08	166,74	8,19	-0,99

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 6 Datos experimentales obtenidos para G2 y Q2

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,9	17,00	11,36	20,24	127,34	9,12	-3,22
1	0,5	6,05	17,50	29,65	16,98	173,32	8,79	-2,74
2	1	6,5	17,10	49,96	25,68	173,67	8,38	-1,88
3	1,5	6,6	17,00	46,67	23,50	172,89	8,45	-1,85
4	2	6,4	17,20	47,21	23,94	175,82	8,44	-2,04
5	2,5	6,65	17,20	46,12	22,63	175,68	8,47	-1,77
6	3	6,7	16,40	49,41	22,63	174,46	8,44	-1,74
7	3,5	6,7	16,80	46,12	22,63	174,25	8,47	-1,77
8	4	6,7	16,90	47,21	22,63	175,18	8,46	-1,76
9	4,5	6,9	16,70	50,21	26,00	175,32	8,37	-1,47
10	5	7	17,00	52,60	28,20	175,75	8,32	-1,32
11	5,5	7,2	17,10	54,60	29,13	179,54	8,29	-1,09
12	6	7,3	17,10	57,10	30,00	181,97	8,26	-0,96
13	6,5	7,5	17,50	59,29	31,31	178,61	8,22	-0,72
14	7	7,5	18,00	59,29	31,31	182,47	8,22	-0,72

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 7 Datos experimentales obtenidos para G3 y Q2

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,9	17,00	11,36	20,24	127,34	9,12	-3,22
1	0,5	6	17,50	14,46	16,34	132,28	9,11	-3,11
2	1	6,45	17,10	19,62	19,07	136,42	8,91	-2,46
3	1,5	6,8	17,00	20,65	19,46	137,42	8,88	-2,08
4	2	6,8	17,20	20,65	20,62	137,28	8,85	-2,05
5	2,5	6,7	17,20	19,62	19,46	137,71	8,90	-2,20
6	3	6,9	16,40	19,62	18,66	136,71	8,92	-2,02
7	3,5	6,9	16,80	18,51	18,29	135,85	8,95	-2,05
8	4	6,8	16,90	19,12	18,87	134,28	8,93	-2,13
9	4,5	6,8	16,70	19,62	18,48	134,35	8,92	-2,12
10	5	6,8	17,00	19,01	18,48	132,92	8,94	-2,14
11	5,5	6,9	17,10	27,88	22,55	132,92	8,68	-1,78
12	6	7	17,10	30,98	23,32	133,35	8,62	-1,62
13	6,5	7	17,50	30,98	23,32	132,92	8,62	-1,62
14	7	7	18,00	30,98	23,32	132,92	8,62	-1,62

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 8 Datos experimentales obtenidos para G4 y Q2

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,9	17,00	11,36	20,24	127,34	9,12	-3,22
1	0,5	5,95	17,50	28,40	14,40	127,34	8,87	-2,92
2	1	6,4	17,10	29,95	16,63	127,06	8,78	-2,38
3	1,5	6,35	17,00	30,46	17,48	129,49	8,76	-2,41
4	2	6,15	17,20	30,46	17,27	126,91	8,76	-2,61
5	2,5	6,25	17,20	30,98	18,12	127,13	8,73	-2,48
6	3	6,2	16,40	30,98	17,91	126,48	8,74	-2,54
7	3,5	6,3	16,80	32,01	18,12	125,91	8,72	-2,42
8	4	6,2	16,90	32,01	17,48	125,20	8,73	-2,53
9	4,5	6,2	16,70	32,01	17,48	125,55	8,73	-2,53
10	5	6,3	17,00	34,08	18,74	124,91	8,68	-2,38
11	5,5	6,4	17,10	36,14	19,17	125,13	8,64	-2,24
12	6	6,5	17,10	37,18	20,02	125,48	8,61	-2,11
13	6,5	6,4	17,50	36,14	19,17	125,20	8,64	-2,24
14	7	6,40	18,00	36,14	19,17	124,70	8,64	-2,24

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 9 Datos experimentales obtenidos para G2 y Q3

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,70	17,00	11,44	16,26	127,34	9,21	-3,51
1	0,5	6,05	17,50	37,69	16,98	173,32	8,68	-2,63
2	1	6,42	17,10	38,21	18,70	173,67	8,64	-2,22
3	1,5	6,50	17,00	37,18	18,70	172,89	8,65	-2,15
4	2	6,45	17,20	37,18	19,35	175,82	8,63	-2,18
5	2,5	6,55	17,20	38,21	19,35	175,68	8,62	-2,07
6	3	6,55	16,40	38,21	19,35	174,46	8,62	-2,07
7	3,5	6,60	16,80	38,21	19,35	174,25	8,62	-2,02
8	4	6,60	16,90	38,21	18,70	175,18	8,64	-2,04
9	4,5	6,90	16,70	52,15	18,70	175,32	8,50	-1,60
10	5	6,90	17,00	52,15	19,35	175,75	8,49	-1,59
11	5,5	7,20	17,10	56	19,35	179,54	8,46	-1,26
12	6	7,40	17,10	58,19	19,35	181,97	8,44	-1,04
13	6,5	7,50	17,50	60,39	19,51	178,61	8,42	-0,92
14	7	7,50	18,00	60,39	19,51	182,47	8,42	-0,92

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 10 Datos experimentales obtenidos para G3 y Q3

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T (C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,70	17,00	11,44	16,26	127,34	9,21	-3,51
1	0,5	6,00	17,50	14,46	16,34	140,14	9,11	-3,11
2	1	6,60	17,10	18,07	17,90	139,35	8,97	-2,37
3	1,5	6,70	17,00	18,59	17,71	140,14	8,97	-2,27
4	2	6,80	17,20	17,04	18,09	139,93	9,00	-2,20
5	2,5	6,80	17,20	17,56	17,71	139,07	8,99	-2,19
6	3	6,90	16,40	17,56	17,89	139,07	8,99	-2,09
7	3,5	6,30	16,80	19,62	17,71	139,43	8,94	-2,64
8	4	6,32	16,90	18,59	18,41	139,57	8,95	-2,63
9	4,5	6,30	16,70	19,10	18,25	140,86	8,94	-2,64
10	5	6,30	17,00	18,07	18,25	141,00	8,97	-2,67
11	5,5	6,70	17,10	23,75	18,25	140,71	8,85	-2,15
12	6	6,80	17,10	25,82	18,25	140,43	8,81	-2,01
13	6,5	6,90	17,50	27,88	18,70	140,21	8,77	-1,87
14	7	6,90	18,00	27,88	18,70	139,71	8,77	-1,87

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 11 Datos experimentales obtenidos para G4 y Q3

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,71	17,00	11,44	127,34	9,21	-3,50
1	0,5	5,95	17,50	28,40	127,34	8,87	-2,92
2	1	6,30	17,10	30,98	127,06	8,77	-2,47
3	1,5	6,35	17,00	32,01	129,49	8,74	-2,39
4	2	6,35	17,20	32,01	126,91	8,73	-2,38
5	2,5	6,30	17,20	29,95	127,13	8,76	-2,46
6	3	6,15	16,40	29,95	126,48	8,77	-2,62
7	3,5	6,25	16,80	32,01	125,91	8,72	-2,47
8	4	6,25	16,90	30,98	125,20	8,74	-2,49
9	4,5	6,25	16,70	32,01	125,55	8,72	-2,47
10	5	6,20	17,00	32,53	124,91	8,72	-2,52
11	5,5	6,30	17,10	34,08	125,13	8,69	-2,39
12	6	6,50	17,10	32,20	125,48	8,72	-2,22
13	6,5	6,50	17,50	32,15	125,20	8,72	-2,22
14	7	6,52	18,00	32,30	125,13	8,72	-2,20

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 12 Datos experimentales obtenidos para G3 y Q4

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,72	17,00	14,46	16,34	124,91	9,11	-3,39
1	0,5	6,00	17,50	14,46	16,34	132,28	9,11	-3,11
2	1	6,65	17,10	23,75	17,51	136,42	8,86	-2,21
3	1,5	6,70	17,00	27,37	17,9	137,42	8,79	-2,09
4	2	6,60	17,20	27,88	18,29	137,28	8,78	-2,18
5	2,5	6,90	17,20	28,40	17,9	137,71	8,78	-1,88
6	3	6,70	16,40	28,92	18,48	136,71	8,76	-2,06
7	3,5	6,75	16,80	28,40	19,35	135,85	8,74	-1,99
8	4	6,65	16,90	27,88	17,08	134,28	8,81	-2,16
9	4,5	6,60	16,70	27,88	17,08	134,35	8,81	-2,21
10	5	6,60	17,00	27,88	17,89	132,92	8,78	-2,18
11	5,5	6,90	17,10	27,88	18,70	132,92	8,77	-1,87
12	6	7,00	17,10	30,98	18,25	133,35	8,73	-1,73
13	6,5	7,00	17,50	30,98	18,70	132,92	8,72	-1,72
14	7	6,90	18,00	30,98	18,25	132,92	8,73	-1,83

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

- TABLA A4. 13 Datos experimentales obtenidos para G4 y Q4

# Muestra	Tiempo (h)	pH	T(C)	alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Calcio (mg Ca/l)	TDS (mg/l)	pHs	I.L.
0	0	5,72	17,00	14,46	16,34	124,91	9,11	-3,39
1	0,5	5,95	17,50	30,98	17,05	133,99	8,76	-2,81
2	1	6,40	17,10	32,01	17,48	133,56	8,73	-2,33
3	1,5	6,40	17,00	32,01	17,05	133,28	8,75	-2,35
4	2	6,30	17,20	29,95	17,48	133,56	8,76	-2,46
5	2,5	6,15	17,20	29,95	16,63	134,06	8,79	-2,64
6	3	6,25	16,40	32,01	17,05	0,00	8,66	-2,41
7	3,5	6,20	16,80	30,98	17,69	0,00	8,66	-2,46
8	4	6,30	16,90	32,01	18,12	133,06	8,72	-2,42
9	4,5	6,30	16,70	32,53	17,91	132,70	8,72	-2,42
10	5	6,25	17,00	37,18	17,91	132,35	8,66	-2,41
11	5,5	6,50	17,10	37,18	17,08	132,35	8,68	-2,18
12	6	6,40	17,10	36,14	17,89	132,13	8,67	-2,27
13	6,5	6,50	17,50	37,18	17,08	132,85	8,68	-2,18
14	7	6,50	18,00	37,18	17,08	131,49	8,68	-2,18

Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

ANEXO N°5

EJEMPLO DE CÁLCULO DEL I.L.

A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo del I.L., índice que fue el parámetro de control del estado de saturación del CaCO_3 en las aguas corrosivas.

Se utilizaron para su cálculo las ecuaciones 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 y 2.19

$$I.L. = pH - pH_s \quad (0.15)$$

$$pH_s = pka_{2c} - pkso_c + (-\log(\text{Ca}^{2+}/40000)) + (-\log(\text{Alc}/50000)) \quad (0.26)$$

$$pka_{2c} = pka_2 - \frac{2 * u^{0,5}}{1 + 1,4u^{0,5}} \quad (0.37)$$

$$pkso_c = pkso - \frac{4u^{0,5}}{1 + 3,9u^{0,5}} \quad (0.48)$$

$$u = 2,5 * 10^{-5} * TDS \quad (0.59)$$

Datos iniciales agua sintética para la experimentación con el caudal Q1 y G1

- pH = 5,7
- alcalinidad = 20 mg CaCO_3 / L
- Calcio = 22,42 mg Ca / L
- Ce = 178,1 $\mu\text{s/s}$
- TDS fueron calculados a partir de la conductividad eléctrica Ce con factor sugerido para este tipo de aguas de la Figura 3.13 del inciso 3.4.1
TDS = $178,1 * 0,715 = 127,341$ mg / L
- pka2 = 10,38
- pkso = 8,28

Partiendo de la ecuación 2.19

$$u = 2,5 * 10^{-5} * 127,341$$

$$u = 0,00318$$

A partir de las ecuaciones 2.17 y 2.18 se calculó pka_{2c} y pkso_c

$$pka_{2c} = 10,38 - \frac{2 * 0,00318^{0,5}}{1 + 1,4 * 0,00318^{0,5}}$$

$$pka_{2c} = 10,275$$

$$pkso_c = 8,28 - \frac{4 * 0,00318^{0,5}}{1 + 3,9 * 0,00318^{0,5}}$$

$$pkso_c = 8,095$$

El pHs se calculó a partir de la ecuación 2.16 y con los datos obtenidos de pka_{2c} y $pkso_c$

$$pHs = 10,275 - 8,095 + (-\log(22,42/40000)) + (-\log(20/50000))$$

$$pHs = 8,830$$

$$pHs = 8,829$$

Por lo tanto, el I.L. se calculó con la ecuación 2.15

$$I.L. = 5,7 - 8,829$$

$$I.L. = -3,129$$

ANEXO N°6**EJEMPLO DE CÁLCULO DE K_{La}**

- **Cálculo del coeficiente de transferencia de masa**

El cálculo del coeficiente de transferencia se lo realizó a partir de las ecuaciones 2.28, 2.29 y 2.30,

$$Z = N_{OL} \cdot H_{OL} \quad (2.28)$$

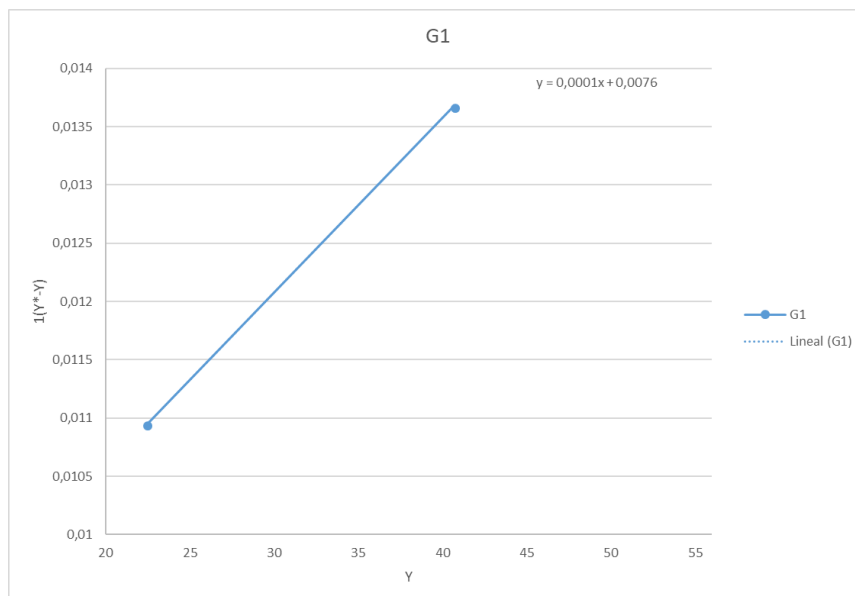
$$N_{OL} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{x^* - x} \quad (2.29)$$

$$H_{OL} = \frac{L}{K_L \cdot a} \quad (2.30)$$

Condiciones del agua para la experimentación con el Q1 y G1

- $\text{Ca}^{+2}_o = x_1 = 22,418 \text{ mg Ca / L}$
- $\text{Ca}^{+2}_f = x_2 = 40,655 \text{ mg Ca / L}$
- $\text{Ca}^{+2}_{eq} = x^* = 78,645 \text{ mg Ca / L}$
- altura del lecho empacado, $Z = 0,40 \text{ m}$

Se construye la gráfica detallada en la Figura 2.11



Elaborado por: De la Torre D.; Vaca F.

Se realiza una regresión lineal y para poder encontrar la función que permita calcular el área bajo la curva.

$$f(x) = 0,0001x + 0,0076$$

El número de unidades de transferencia para la fase líquida N_{OL} fue calculado integrando la función $f(x)$ de la ecuación 2.29 evaluado entre x_1 y x_2 .

$$N_{OL} = \int_{22,418}^{40,655} 0,0005x + 0,0073$$

$$N_{OL} = 0,196$$

A partir del número de unidades de transferencia es posible el cálculo de la altura de una unidad de transferencia H_{OL} con la ecuación 2.28.

$$0,40 = 0,196 * H_{OL}$$

$$H_{OL} = 2,039$$

Finalmente, el cálculo del coeficiente de transferencia de masa se lo realiza con la ecuación 2.30

$$0,9508 = \frac{0,095 \left(\frac{l}{min} \right) * \frac{1Kg}{1L} * \frac{60min}{h}}{0,000791m^2}$$

$$Kl * a$$

$$Kla = 3522,453 \text{ kg/hm}^2$$

Siendo $a = 14852,45 \text{ m}^2/\text{m}^3$

$$Kl = 0,237 \text{ kg/hm}^2$$

ANEXO N°7**DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE
CONDICIONES DE EQUILIBRIO**