

Desarrollo de correlaciones estadísticas para la predicción de corrosión interna en líneas de recolección de hidrocarburos

Álvaro Javier Mejía Díaz

Práctica empresarial realizada como requisito de grado para optar al título de Ingeniero

Químico

Director:

Arlex Chaves Guerrero

Ingeniero Químico, PhD

Codirector

Juan Carlos Díaz Álvarez

Ingeniero Químico, MSc

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2019

Tabla de Contenido

	Pág.
1. Marco teórico	12
1.1 Generalidades de la empresa.....	12
1.1.1 Nombre de la empresa..	12
1.1.2 Nit..	12
1.1.3 Actividad económica..	12
1.1.4 Empleados.....	12
1.1.5 Estructura organizacional.....	12
1.1.6 Dirección.....	13
1.1.7 Reseña histórica.	13
1.1.8 Descripción área específica de trabajo.....	14
1.2 Planteamiento y justificación del problema.....	14
1.3 Principios científicos e ingenieriles	15
1.3.1 Efecto de la composición del agua.....	17
1.3.2 Efecto del pH..	18
1.3.3 Efecto de la temperatura.	18
1.3.4 Efecto de gases corrosivos (CO ₂ , H ₂ S).....	18
1.3.5 Efecto de la velocidad de flujo.....	18
1.3.6 Efecto del flujo multifásico.....	19

2. Objetivos	21
2.1 Objetivo General	21
2.2 Objetivos Específicos.....	21
3. Alcance.....	21
4. Metodología	22
4.1 Levantamiento de la información	23
4.1.1 Recopilación de información histórica del fluido, condiciones operacionales, diseño y construcción.	24
4.1.2 Organización y segmentación de la información.....	24
4.1.3 Cálculos de las propiedades de transporte.	24
4.2 Determinación de las variables	24
4.2.1 Identificación de mecanismos de daño..	25
4.2.2 Identificación de parámetros de mayor afectación.	25
4.3 Desarrollo de correlaciones para la corrosión interna.....	25
4.3.1 Desarrollo análisis multivariable.	26
4.3.2 Selección del modelo estadístico aplicable.....	26
4.4 Validación de correlaciones para la corrosión interna.....	27
4.4.1 Corrida del modelo en tramos específicos de tubería.	27
4.4.2 Aplicación validación estadística.....	27
5. Resultados	28

5.1 Levantamiento de la información	28
5.2 Determinación de variables.....	29
5.3 Desarrollo de correlaciones para la corrosión interna.....	32
5.4 Validación correlaciones para la corrosión interna.....	35
6. Conclusiones	41
7. Recomendaciones	42
Referencias bibliograficas.....	43
Apéndices.....	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Modelos de predicción de velocidad de corrosión.....	20
Tabla 2. Información recopilada para cada línea estudiada.	28
Tabla 3. Análisis multivariable de la velocidad de corrosión.	33
Tabla 4. Análisis multivariable de la velocidad de flujo.....	33
Tabla 5. Análisis multivariable de la concentración de dióxido de carbono disuelto.....	34
Tabla 6. Parámetros estadísticos de las variables velocidad de flujo y CO ₂ disuelto.	35
Tabla 7. Tabla ANOVA para la velocidad de corrosión real y calculada.....	36
Tabla 8. Tabla de medias para la velocidad de corrosión con intervalos de confianza del 95..	37
Tabla 9.Consolidado de parámetros estadísticos en la evaluación de la capacidad de predicción de los modelos de corrosión.	41
Tabla 10. Plantilla para la recopilación de la información.....	45
Tabla 11. Análisis multivariable para el pH.....	46
Tabla 12. Análisis multivariable para la conductividad.....	46
Tabla 13. Análisis multivariable para los cloruros.....	47
Tabla 14. Análisis multivariable para los sulfatos.	47
Tabla 15. Análisis multivariable para las bacterias sulfato-reductoras.....	48
Tabla 16. Análisis multivariable para las bacterias productoras de ácido.	48
Tabla 17. Análisis multivariable para la concentración de sólidos.....	49
Tabla 18. Parámetros estadísticos de las variables descartadas.	50

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Estructura organizacional de la CIC	12
Figura 2. Esquema de la distribución del agua en una emulsión agua-petróleo para una tubería horizontal.	17
Figura 3. Patrones de flujo para fluido multifásico.	19
Figura 4. Metodología de trabajo.	23
Figura 5. Cupón gravimétrico nuevo.	30
Figura 6. Morfología de daño por velocidad de flujo.	30
Figura 7. Corrosión por CO ₂ de una línea de recolección de hidrocarburos.	31
Figura 8. Morfología de los agujeros de corrosión debidos a MIC.	32
Figura 9. Corrida del modelo en puntos específicos.	36
Figura 10. Gráfico de medias para la velocidad de corrosión con intervalos de confianza del 95%	38
Figura 11. Comparación entre velocidades de corrosión experimentales y simuladas para líneas de recolección de hidrocarburos versus el número de corrida para el pozo donde se evaluó la corrosión.	39
Figura 12. Correlación entre las velocidades de corrosión simulada por los modelos y los datos reales para las líneas de recolección de hidrocarburos.	40

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A.Base de datos.....	45
Apéndice B. Análisis multivariable	46
Apéndice C.Parámetros estadísticos de las variables no significativas del modelo.....	50

Resumen

Título: Desarrollo de correlaciones estadísticas para la predicción de corrosión interna en líneas de recolección de hidrocarburos*

Autor: Álvaro Javier Mejía Díaz**

Palabras claves: Corrosión interna, análisis multivariable, regresión múltiple.

Descripción

En esta práctica empresarial se desarrolló una correlación estadística para predecir velocidad de corrosión en sistemas de recolección de crudo, principalmente para líneas de flujo de pozos ubicados en el campo La Cira Infantas (LCI).

Inicialmente, se elaboró una base de datos conformada principalmente por: parámetros de diseño, condiciones de operación, propiedades fisicoquímicas, y velocidades de corrosión, permitiendo posteriormente un fácil manejo y análisis de la información.

Se analizaron los mecanismos de daño según la morfología de los materiales usados para medir la velocidad de corrosión, donde se pudo identificar factores relevantes como la velocidad de flujo, dióxido de carbono disuelto, pH, conductividad, cloruros, sulfatos, bacterias (bacterias sulfato-reductoras y bacterias productoras de ácido) y concentración de sólidos, los cuales afectan directamente los sistemas estudiados.

Posteriormente, se desarrolló un modelo matemático basado en correlaciones estadísticas con los datos de las variables identificadas, determinando aquellas que son significativas mediante análisis multivariable y regresión múltiple. Este análisis permitió definir, que el contenido de CO₂ en la fase líquida (CO₂ Disuelto), y la velocidad de flujo son los factores más representativos para modelar el proceso de corrosión que se evidencia en las líneas de flujo de los pozos.

La capacidad predictiva del modelo desarrollado se evaluó con un grupo determinado de datos, y de manera conjunta con modelos ampliamente usados en la industria. Se encontró que la correlación estadística desarrollada predice satisfactoriamente el comportamiento de la velocidad de corrosión, presentando un error relativo medio (ER) inferior al 70%, y un error cuadrático (ECM) medio inferior al valor promedio de los datos de velocidad de corrosión. Los modelos de literatura predicen velocidades de corrosión que muestran %ER superiores al 1000%. De esta manera, el modelo de correlación propuesto puede ser considerado una alternativa confiable y adecuada para explicar la variabilidad de la velocidad de corrosión obtenida en las líneas de flujo de los pozos del campo LCI.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Arlex Chaves Guerrero PhD en Ingeniería Química Codirector: Juan Carlos Díaz Álvarez MSc en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Development of statistical correlations for the prediction of internal corrosion in hydrocarbon collection lines *

Authors: Álvaro Javier Mejía Díaz**

Keywords: Internal corrosion, multivariable analysis, multiple regression

Summary

In this business practice, a statistical correlation was developed to predict the corrosion rate in oil gathering systems, mainly for wells located in the La Cira Infantas (LCI) field.

Initially, a database was created, consisting mainly of: design parameters, operating conditions, physicochemical properties, and corrosion rates, subsequently allowing easy handling and analysis of information.

Damage mechanisms were identified according to the morphology shown by the materials used to measure the corrosion rate. It was possible to identify relevant factors in the corrosion process such as flow rate, dissolved carbon dioxide, pH, conductivity, chlorides, sulfates, bacteria (reducing sulfate bacteria and acid producing bacteria) and solids concentration, which directly affect the systems studied. Subsequently, a mathematical model based on statistical correlations was developed using information from previously defined parameters. Multivariable analysis and multiple regression were performed to determine the most important factors according to the behavior of the data. It was found that the content of dissolved carbon dioxide and the flow rate are the most representative factors.

The statistical correlation developed, and the models used in the industry were evaluated with experimental data. It was found that the statistical correlation developed successfully predicts the behavior of the corrosion rate, presenting a mean relative error (ER) of less than 70%, and a mean square error (ECM) of less than the average value of the corrosion rate data. Literature models predict corrosion rates that show %ER greater than 1000%. In this way, the proposed correlation model can be considered a reliable and adequate alternative to explain the variability of the corrosion rate obtained in the flow lines.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Arlex Chaves Guerrero PhD en Ingeniería Química Codirector: Juan Carlos Díaz Álvarez MSc en Ingeniería Química.

1. Marco teórico

1.1 Generalidades de la empresa

1.1.1 Nombre de la empresa. CIC, Corporación para la Investigación de la Corrosión.

1.1.2 Nit. 800254591.

1.1.3 Actividad económica. La Corporación para la Investigación de la Corrosión C.I.C. es un Centro de Desarrollo Tecnológico creado en el marco de la ley colombiana de Ciencia y Tecnología; es de carácter mixto, sin ánimo de lucro, y su objeto es la producción de conocimiento, innovación y tecnología, a partir de la solución de problemas de corrosión industrial.

1.1.4 Empleados. La CIC cuenta actualmente con 119 funcionarios, entre ellos 3 doctores, 12 magísteres, 20 profesionales en ciencias, 52 ingenieros, 25 tecnólogos y técnicos, 7 administrativos y 5 estudiantes, conformando así un equipo interdisciplinario.

1.1.5 Estructura organizacional

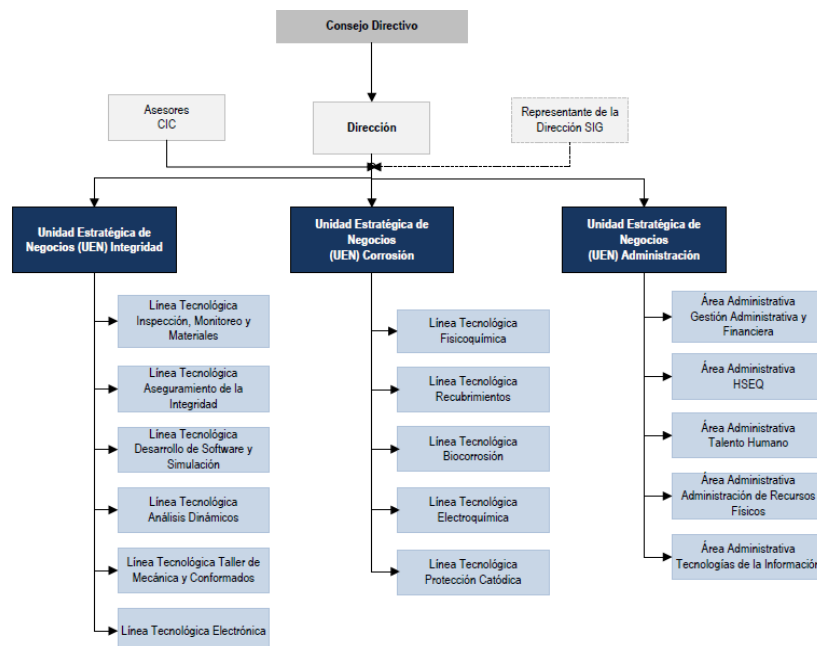


Figura 1. Estructura organizacional de la CIC

1.1.6 Dirección. km 2 vía refugio, sede UIS -Guatiguará.

1.1.7 Reseña histórica. En Colombia tradicionalmente ha existido una brecha entre la producción de conocimiento en ciencia y tecnología y las prácticas de la industria pública y privada. Esto se ha visto reflejado principalmente en que centros que producen conocimiento como las universidades no han desarrollado los suficientes vínculos y comunicación con las problemáticas del sector productivo. Evaluando esto en 1990, se crea la legislación de ciencia y tecnología colombiana (Ley 29 de 1990) donde se crean los centros de investigación y desarrollo. En 1994 se crea la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC) como uno de los primeros centros de desarrollo e investigación de Colombia orientada a brindar soluciones integrales y generar conocimiento alrededor del fenómeno de la corrosión. La CIC, fue creada inicialmente con el apoyo de planeación nacional, Colciencias y la Universidad Industrial de Santander dentro del marco de investigación y desarrollo. Pronto se unió el sector privado y otras universidades y se creó un Consejo Directivo que ha guiado la Corporación a lo largo de su existencia. El Consejo Directivo está conformado por Colciencias, el SENA, el Centro Internacional de Física, Oxy, Equión, Sika Ltda, UIS y Ecopetrol. Sin embargo, la CIC ha trabajado con empresas tan diversas como Promigas, Cotecmar, Avianca, la Fuerza Aérea Colombiana, TGI entre otras.

1.1.8 Descripción área específica de trabajo. Unidad Estratégica de Negocios (UEN) Integridad, más específicamente en la línea tecnológica aseguramiento de la integridad. Dentro de las tantas actividades que se aborda en la línea tecnológica, se resalta el diseño y la implementación de metodología para evaluar la corrosión en sistemas de transporte y almacenamiento de hidrocarburos. Para ello se dispone de normas recomendadas por la industria, y propiamente metodologías desarrolladas por la CIC. Las metodologías CIC han tenido un impacto importante sobre los activos de diferentes compañías, generando como resultados principales: planes de acción priorizados, asignación eficiente de recursos, reducción de costos asociadas a fallas o fugas en el sistema, y reducción del impacto ambiental por causa de menores pérdidas de contención de fluidos.

1.2 Planteamiento y justificación del problema

Los sistemas de flujo desempeñan un papel importante en la producción y el transporte de petróleo y gas, ya que son sistemas eficientes en términos económicos y técnicos para la transferencia de fluidos. Sin embargo, estos sistemas tienden a corroerse en el tiempo por su condición termodinámica. El fenómeno de corrosión es uno de los principales problemas en las líneas de recolección de hidrocarburos, y la mayoría de estos, están vinculados a la presencia de gases corrosivos (por ejemplo, CO₂ y H₂S), bacterias, velocidades de flujo y la acumulación de sólidos y agua dentro de la misma tubería, los cuales interactúan en el sistema, produciendo diferentes formas de corrosión (Biomorgi *et al.*, 2012).

La gestión de integridad en tuberías es un proceso dinámico que busca garantizar la operación de los activos cuando estos se encuentran expuestos a diferentes amenazas, entre las cuales se destaca la corrosión interna. Así mismo, los programas de integridad tienen como objetivo principal valorar la amenaza y reducir eficientemente el nivel de riesgo de los activos a través de

la implementación de diferentes actividades (Xie & Tian, 2018). En este sentido, existen diferentes alternativas que de forma complementaria son de utilidad para valorar el estado o condición de una tubería, entre las cuales se destacan: rutinas de inspección, mantenimiento, metodologías de valoración directa, y metodologías de valoración de riesgos.

La implementación en una fase temprana de métodos predictivos (modelos, metodologías) para valorar la corrosión en sistemas de recolección es una de las alternativas comúnmente usadas en la industria. Es por ello que se dispone de normas como las de NACE International, organización profesional sin fines de lucro para la industria del control de la corrosión cuya misión es *"equipar a la sociedad para proteger a las personas, las propiedades y el medio ambiente de los efectos adversos de la corrosión"*, sin embargo, los documentos muestran únicamente información y procedimientos generales, y muchas opciones de métodos/modelos dependiendo de las características del sistema que se desee evaluar, aun para un mismo sistema de recolección. Esta condición dificulta la implementación del procedimiento descrito en la norma, requiriendo de conocimiento avanzado en el comportamiento de los sistemas a condiciones reales.

Con el fin de abordar esta problemática, en esta práctica empresarial se plantea el desarrollo de correlaciones estadísticas para determinar la velocidad de corrosión interna en líneas de recolección de hidrocarburos, considerando condiciones operacionales, propiedades del fluido y presencia de sólidos.

1.3 Principios científicos e ingenieriles

Según Revie & Uhlig (2008), la corrosión es el ataque destructivo que sufren los materiales debido a su interacción con el ambiente, a través de reacciones químicas y/o electroquímicas. En estas reacciones intervienen diferentes agentes corrosivos y/o compuestos que están en un

ambiente natural o un ambiente propiamente de trabajo (manejo de fluidos). Existen diferentes tipos de corrosión, tales como: uniforme, localizada, galvanizada, por inducción microbiológica, entre otros, los cuales pueden presentarse de manera interna o externa en una tubería. Para el presente trabajo se establece como tema de estudio, la corrosión interna, la cual se asocia al tipo de fluido contenido o transportado, ya sea de tuberías, equipos de procesos, entre otros.

La afectación de la corrosión y su nivel de severidad sobre los activos es función de las condiciones operativas y el ambiente; dentro de las diferentes variables que pueden afectar los procesos de corrosión interna en tuberías, se destaca: composición del agua, pH, temperatura, agentes corrosivos, velocidad de flujo, entre otros. A continuación, se describen algunas de ellas.

1.3.1 Efecto de la composición del agua. Es uno de los parámetros que más influye en la corrosión cuando está presente el CO_2 en el fluido transportado, la disociación de los agentes corrosivos puede variar de muy simple cuando están presentes unas pocas especies carbónicas a muy complejas con numerosas especies encontradas (Nešić, 2007). La cantidad de agua y las condiciones operacionales también influyen en la susceptibilidad de las tuberías a presentar corrosión interna. Se ha observado que para el flujo de fluidos estratificados la probabilidad de corrosión es mayor que para flujo de fluidos dispersos; esto se explica en el hecho que en la primera situación la tubería tiene mayor cantidad de área mojada por agua. En la Figura 2 se observa un esquema de los diversos patrones de flujo de la emulsión agua – petróleo, desde dispersos (A) hasta estratificados (D) para un oleoducto horizontal.

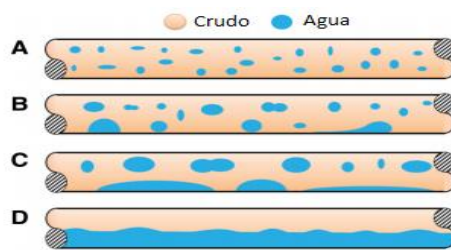


Figura 2. Esquema de la distribución del agua en una emulsión agua-petróleo para una tubería horizontal.

1.3.2 Efecto del pH. El pH tiene un efecto directo en la velocidad de corrosión, este relaciona la variabilidad de las condiciones para la formación de escamas de carbonato de hierro, las cuales actúan como una barrera protectora reduciendo la tasa de pérdida de material. Un alto pH genera como resultado una disminución de la solubilidad del carbonato de hierro (FeCO_3) y conduce a un aumento de la tasa de precipitación, lo que finalmente resulta en una disminución de la velocidad de corrosión (Reyes Cruz, Veloz Rodríguez, & Esparza Zúñiga, 2012) (Nešić, 2007).

1.3.3 Efecto de la temperatura. Un aumento de la temperatura aumenta la velocidad de la corrosión en un material, debido a que la temperatura acelera la cinética de las reacciones (Roberge *et al.*, 2000). Sin embargo, películas protectoras son formadas más fácilmente a altas temperaturas (más de 100 °C), en tales casos la velocidad de corrosión alcanza un máximo a una temperatura dada y luego decrece.

1.3.4 Efecto de gases corrosivos (CO_2 , H_2S). La velocidad de corrosión depende de muchos factores, en los que se incluyen la concentración de CO_2 y/o H_2S en la fase gaseosa, eso conlleva a la importancia de la presión en el sistema. El dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno se disuelven en agua para formar ácidos débiles que son sustancias corrosivas para materiales de acero al carbono (Fuentes & Peña, 2007).

1.3.5 Efecto de la velocidad de flujo. En el caso de bajos cortes de agua la velocidad de flujo tiene un efecto inverso sobre la velocidad de corrosión. Es decir, al aumentar la velocidad de flujo, la turbulencia se hace mayor, favoreciendo que las gotas de agua se dispersen más fácilmente en la fase de crudo. De esta manera, la tubería estará mayormente mojada por crudo, reduciendo el impacto de la corrosión. Adicionalmente, la turbulencia contribuye también a mantener suspendidas las partículas sólidas, si esto ocurre, la probabilidad de corrosión interna debido a la acumulación de agua y sólidos disminuye (Ngan, 2010).

1.3.6 Efecto del flujo multifásico. Uno de los fenómenos más complejos de analizar es el efecto del flujo multifásico sobre la corrosión, ya que muchas de las tuberías y líneas de flujo que transportan petróleo y gas funcionan bajo dos o más condiciones de flujo en tres fases, donde se puede encontrar diferentes patrones de flujo, como lo son: estratificado, intermitente, anular y burbuja dispersa (Nešić, 2007), como se muestra en la Figura 3.

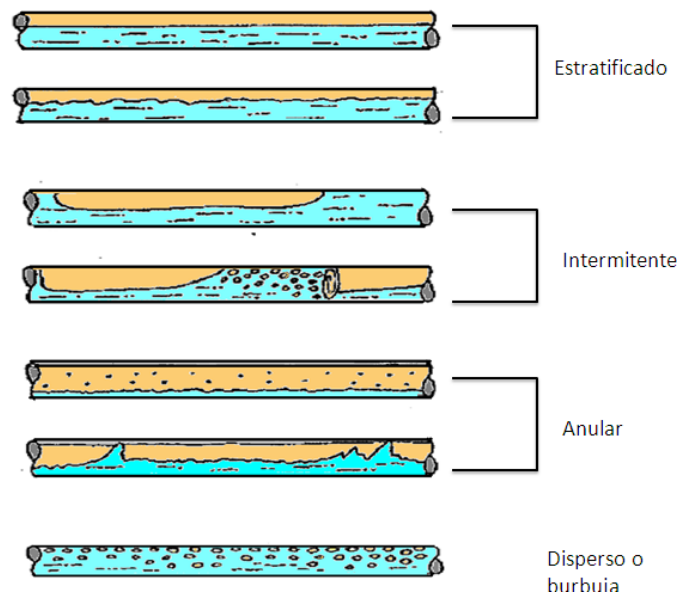


Figura 3. Patrones de flujo para fluido multifásico.

Debido a la complejidad del fenómeno de corrosión, diferentes autores tomaron la iniciativa de estudiar el efecto de diferentes variables sobre el proceso de corrosión en tuberías a través de la ejecución de ensayos experimentales. Estos estudios permitieron proponer diferentes modelos predictivos que intentan explicar el fenómeno. Es por esta razón, que la industria tiene a su disposición diferentes modelos de predicción de velocidad de corrosión, y cada uno de ellos tiene sus particularidades. Entre los más usados se destacan: De Waard93¹, De Waard95², Norsok³, y el modelo Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC). En la siguiente tabla se describe información general de cada uno de ellos.

Tabla 1.

Modelos de predicción de velocidad de corrosión

Modelo	Descripción y características	Validación	Limitaciones
De Waard 93	Modelo semi-empírico Incluye correcciones por: Presión, formación capas protectoras, pH, presencia hidrocarburos, condensación agua.	Validación del modelo con datos de campo en sistemas de transporte de gas.	• No es aplicable en presencia de H₂S. • No considera el efecto de la velocidad del fluido y características del material.
De Waard 95	Modelo semi-empírico, ajuste no lineal. Incluye correcciones por: • Velocidad de líquido, Microestructura y composición del acero. • Modelo ajustado a datos de laboratorio (T=20-80°C, V= 0,1-8,5 m/s, P<6,5 bar).	Experimentos realizados en condiciones de flujo y ambientes controlados (Loop). V _{corr} , cupones.	• No es aplicable en presencia de H₂S. • No considera efecto del patrón de flujo.
Norsok	Modelo empírico desarrollado por Norwegian oil companies Statoil, Norsk Hydro and Saga Petroleum. Incluye un factor de corrección más fuerte para la formación de capas protectoras en altas T y pH.	El modelo es validado en gran parte a los datos obtenidos por De Waard. Incluye datos adicionales más recientes en altas T (>100°C).	• No es aplicable en presencia de H₂S. • No considera la composición del acero. • No considera efecto del patrón de flujo.
CIC	Modelo electroquímico basado en equilibrio de fases y modelos de transporte de especies iónicas. Puede ser usado en ambientes con CO ₂ y H ₂ S.	Validación del modelo con métodos electroquímicos (resistencia de polarización lineal LPR, Pendientes Tafel).	• Las estimaciones de V_{corr} son independientes del tipo de patrón de flujo presente en el sistema.

Los modelos de predicción de velocidad de corrosión son muy usados en situaciones en la cuales se constituyen como una única alternativa de evaluación de corrosión. Por ejemplo:

1. Diseño y dimensionamiento de nuevos sistemas de transporte.
2. Evaluación de corrosividad de fluidos debido a que no existen sistemas de monitoreo de velocidad de corrosión.
3. Caracterización de corrosividad de fluidos, y análisis de sensibilidad por cambio de condiciones de operación.

La integridad es una disciplina que busca alinearse con las mejores y más modernas prácticas de la industria para responder ante los requerimientos de seguridad que plantea nuestra sociedad en la actualidad. El objetivo es identificar las amenazas que actúan sobre el sistema de ductos, evaluar su probabilidad de falla y consecuencia, y tomar acciones para mitigar los impactos que

pueda ocasionar el sistema de transporte en caso de una falla sobre diferentes aspectos relevantes, entre ellos: humano, ambiental, imagen, y económico (Xie & Tian, 2018).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo empírico basado en correlaciones estadísticas para la predicción de velocidad de corrosión interna en líneas de recolección de hidrocarburos.

2.2 Objetivos Específicos

Desarrollar una base de datos con la información operacional, diseño, composición del fluido, monitoreo e inspección necesario para evaluar procesos de corrosión.

Determinar las variables de mayor aporte en procesos de corrosión de acuerdo con históricos de monitoreo, inspección y fallas.

Desarrollar correlaciones estadísticas para la predicción de corrosión interna a través de análisis multivariable y regresión múltiple de variables explicativas o independientes.

Implementar y evaluar las correlaciones de predicción de corrosión usando criterios estadísticos e información de la condición del sistema a evaluar.

3. Alcance

El alcance de la presente práctica contempla el desarrollo de un modelo de correlaciones estadísticas a partir del análisis multivariable y regresión múltiple, para la determinación de velocidades de corrosión interna en líneas de recolección de hidrocarburos, considerando la

velocidad de flujo, concentraciones de gases disueltos y bacterias del campo La Cira Infantas (LCI). Las validaciones de los modelos matemáticos se realizan aplicando técnicas estadísticas convencionales y realizando la respectiva comparación con los resultados de medición directa (cupones gravimétricos).

4. Metodología

En este capítulo se detalla la metodología usada para hallar un modelo basado en correlaciones estadísticas que determine la velocidad de corrosión en las tuberías que transportan hidrocarburos de los pozos de producción del campo la Cira Infantas. Para lograr el objetivo planteado, se desarrolló la metodología propuesta a continuación en la Figura 4.

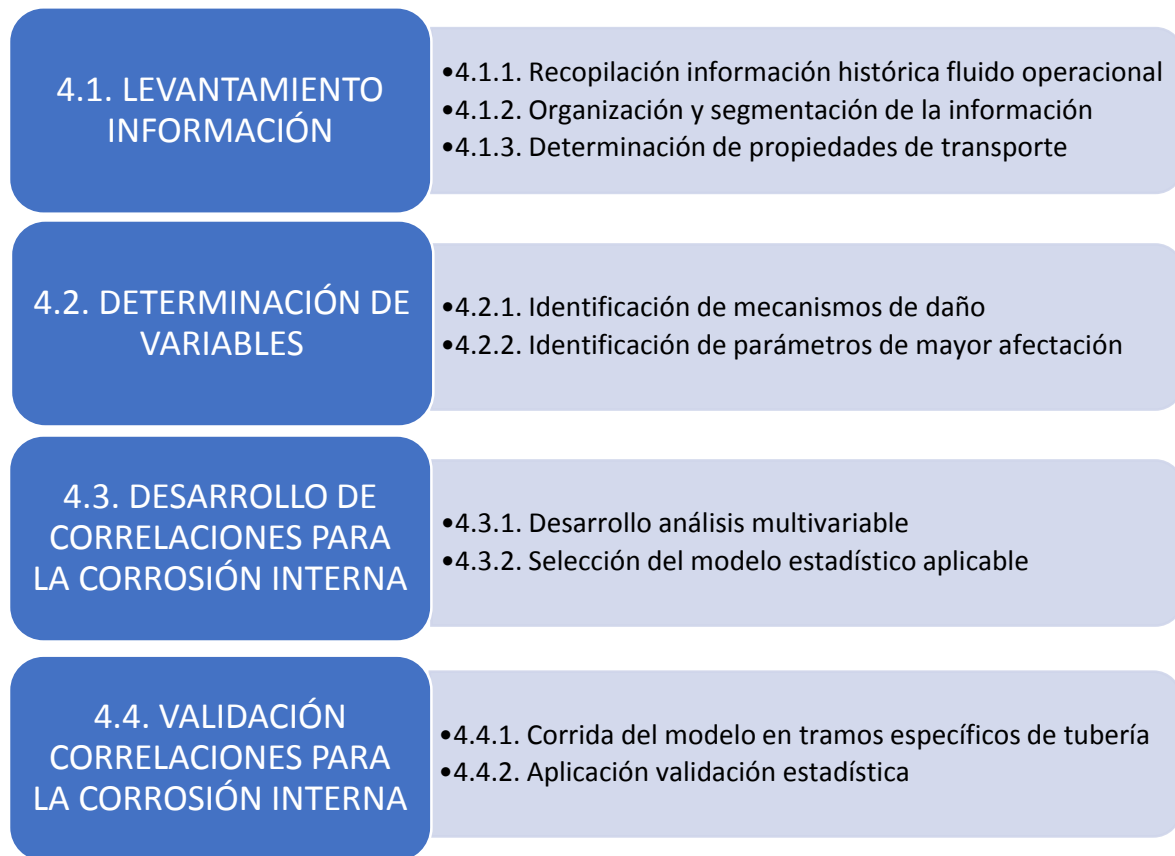


Figura 4. Metodología de trabajo.

4.1 Levantamiento de la información

En esta fase se recopiló información asociada a cada una de las líneas de recolección de los pozos que conforman el campo La Cira Infantas. Posteriormente, se segmenta las líneas dependiendo de las condiciones de cada tramo de tubería, incluyendo el cálculo de las propiedades de transporte. Con esta información se construyó una base de datos en plantillas previamente especificadas, de manera tal, que permitiera un fácil manejo y análisis de la información.

4.1.1 Recopilación de información histórica del fluido, condiciones operacionales, diseño y construcción. La información histórica recopilada se obtuvo de los informes de seguimiento de cada pozo realizado por la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC) para los años 2018 y lo corrido de 2019 donde se encuentra la fisicoquímica del fluido, el volumen producido, las condiciones operacionales, la concentración de sólidos y las velocidades de corrosión; de esta última se tomó el promedio de los 4 meses cercanos al mes de la medición de las demás variables.

4.1.2 Organización y segmentación de la información. Cada línea de recolección de hidrocarburos se dividió en segmentos, esta división se basó en las características distintivas de la línea, las mismas que pueden ser cualquier parámetro relacionado con los constituyentes del crudo, patrón de flujo, condiciones de operación, cambios de flujo o fechas de construcción (Moghissi et al., 2008).

4.1.3 Cálculos de las propiedades de transporte. Se calcularon las siguientes propiedades del fluido y de flujo: Grados API del crudo, viscosidad (dinámica y cinemática), velocidad del fluido y número de Reynolds, con el fin de clasificar al fluido y evaluar la importancia del régimen y patrón de flujo.

4.2 Determinación de las variables

En esta etapa se analiza información directa y representativa de la afectación por corrosión interna que padecen los sistemas de recolección del campo. Esto implica identificación de los mecanismos de daño y los parámetros más representativos que influyen en el proceso de corrosión.

4.2.1 Identificación de mecanismos de daño. Para la identificación de los mecanismos de daño se recopilieron muestras de cupones gravimétricos, los cuales se instalan directamente sobre la tubería, permitiendo así, identificar la magnitud y el tipo de afectación por corrosión. Adicionalmente, se consideró información de registros fotográficos de piezas falladas por procesos de corrosión.

4.2.2 Identificación de parámetros de mayor afectación. Una vez identificados los mecanismos de daño través de las evidencias físicas y el análisis conjunto de la información asociada a cada una de las líneas, permitieron establecer los parámetros que podrían influir en el proceso de corrosión observado.

4.3 Desarrollo de correlaciones para la corrosión interna

Inicialmente, se realiza un análisis multivariable con el fin de determinar el tipo de comportamiento de las variables independientes, y su grado de correlación con la velocidad de corrosión (Variable Dependiente). Posteriormente, se desarrolló el modelo matemático que determina la distribución de la corrosión interna en función de las variables previamente seleccionadas, implicando información de 230 puntos. Como actividad final en esta etapa, se realizó una comparación entre las correlaciones estadísticas y datos específicos de velocidad de corrosión en ciertos tramos de tubería.

4.3.1 Desarrollo análisis multivariable. Con el fin de determinar la tendencia central, la variabilidad, las desviaciones, los máximos, los mínimos y su grado de correlación entre ellas, se realizó un análisis multivariable con el programa *Statgraphics Centurion* (Statgraphics, 2015). La velocidad de flujo, dióxido de carbono disuelto, pH, conductividad, cloruros, sulfatos, bacterias (bacterias sulfato-reductoras y bacterias productoras de ácido) y concentración de sólidos fueron las variables estudiadas con respecto a la velocidad de corrosión.

El análisis implica determinar si las variables presentan normalidad, es decir son homogéneas, con sesgo y curtosis estandarizado. Adicionalmente, se usaron las siguientes funciones transformadas: logaritmo, inversa, cuadrática y raíz para cada una de las variables de estudio con el fin de mejorar las correlaciones estadísticas. Se seleccionaron estas variables transformadas debido a que las mismas son observaciones empíricas que se ajustan la mayoría de las variables (Spiegel, M. R., Schiller, 2001)

4.3.2 Selección del modelo estadístico aplicable. Se desarrolló un modelo que relaciona la velocidad de corrosión con los principales agentes de corrosión interna y demás parámetros asociados, implementando regresión múltiple en el programa *Statgraphics Centurion* (Statgraphics, 2007b). Se utilizó el método de regresión múltiple.

Para la elaboración del modelo matemático se evaluó el impacto estadístico de todas las variables cuantitativas estudiadas, las mismas que puedan afectar internamente las tuberías.

Para obtener mejores predicciones, los coeficientes que acompañan las variables del modelo matemático fueron elegidos de forma tal, que la suma de cuadrados entre los valores observados y los pronosticados sea la mínima, con ello se reduce la varianza residual. Al mismo tiempo, con base en la significancia estadística de las variables independientes en cada modelo, se eliminaron las que no son estadísticamente significativas y se construyó un nuevo modelo matemático.

4.4 Validación de correlaciones para la corrosión interna

La validación del modelo se realizó en función de la zona de estudio (condiciones de la tubería similar a las condiciones con las que se obtuvo el modelo).

4.4.1 Corrida del modelo en tramos específicos de tubería. Se ejecutó el modelo con los datos de 40 pozos aleatorios que no fueron incluidos en el desarrollo de la correlación. Esta cantidad es aproximadamente el 20% de todos los datos, siendo un valor aceptable para validar el modelo basado en correlaciones estadísticas.

4.4.2 Aplicación validación estadística. Se validaron los resultados de los dos niveles de estudio (experimentales y modelo) con un análisis de varianza (ANOVA) y análisis de medias. Con ello se determinó si existe una diferencia estadística significativa entre ambos niveles (Statgraphics, 2015). Adicional se realizó una simulación con modelos trabajados en la industria con el fin de validar la predicción de cada uno incluyendo el modelo de correlaciones estadísticas.

El análisis de varianza (ANOVA) determina si existe diferencia estadística significativa entre los dos niveles de estudio (real y calculado), para ello se determinó la razón F y el valor-P.

Se analizó la dispersión y las medias entre las observaciones presentadas para cada nivel de estudio, para ello se determinaron los intervalos de confianza del 95% con el fin de hallar diferencias significativas entre las mismas.

Se determinaron el error relativo y cuadrático medio de cada modelo, así como el coeficiente de correlación (R^2), esto para evaluar la predicción de cada modelo trabajado en la Industria, que a su vez se compara con el modelo desarrollado en este trabajo.

5. Resultados

En este capítulo se presenta los resultados de cada una de las etapas de la metodología, indicando las consideraciones y especificaciones tenidas en cuenta para finalmente obtener y validar el modelo de regresión múltiple.

5.1 Levantamiento de la información

Para evaluar el impacto de la velocidad de corrosión en las líneas de recolección de hidrocarburos, se requiere analizar los posibles factores que están presentes en los lugares donde se pueda presentar un desgaste de tubería, más específicamente en las paredes de estas, lo que indica que la influencia está directamente relacionada con el fluido transportado, por lo que para cada tubería se recopiló la siguiente información, como lo muestra la Tabla 2.

Tabla 2.

Información recopilada para cada línea estudiada

TIPO DE INFORMACIÓN	PARÁMETRO
Condiciones operacionales	Tasas de flujo
	Corte de agua (BS&W)
	Presión y MOP (máxima presión operacional)
	Temperatura
Especificaciones de diseño	Diámetro tuberías
	Espesor pared metálica
	Tipo de servicio y año instalación
	Planos y ubicación de segmentos del oleoducto
Propiedades fisicoquímicas del fluido	CO ₂ disuelto, H ₂ S disuelto
	pH, conductividad, cloruros, sulfatos, alcalinidad

	Bicarbonatos, sulfuros, sólidos disueltos totales Hierro, magnesio, potasio, sodio, manganeso Calcio, bario, silicio, estroncio
Bacterias	Sulfato-reductoras (BSR) y Productoras de ácido (BPA)
Sólidos	Concentración de sólidos en el fluido
Velocidad de corrosión	Velocidad de corrosión obtenida por cupones

La información de cada uno de los puntos (pozos) se consolidó en plantillas de Excel conformando la base de datos de trabajo (Ver Anexo A).

En este caso para el desarrollo del modelo, se toma el tramo justo en la entrada del pozo dónde se realizó la medición de todas las variables y la velocidad de corrosión, recopilando datos de 230 pozos, además se puede considerar condiciones de flujo constantes para cada línea, ya que la temperatura y grados API no cambian, lo cual indica que las propiedades del fluido son similares en cada tramo.

5.2 Determinación de variables

Los cupones fabricados por la CIC son aptos para el monitoreo de velocidades de corrosión por gravimetría, con diversidad de tamaños. Se fabrican de acuerdo con la necesidad y agresividad del medio, el material de fabricación se selecciona teniendo en cuenta su sistema de tuberías, interés particular o a través de asesoría de la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC). Estos cupones son instalados en las tuberías con el fin de determinar velocidades de corrosión y mecanismos de daño.

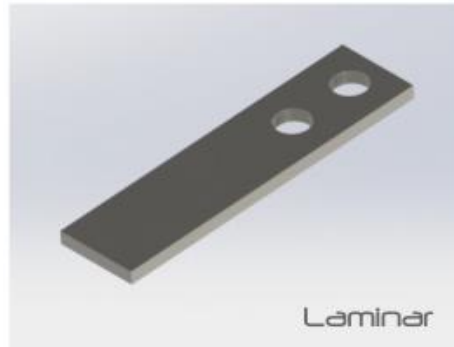


Figura 5. Cupón gravimétrico nuevo.

La Corrosión Acelerada por el Flujo (FAC), se conoce como el proceso de corrosión que requiere un flujo. El medio que fluye está constantemente tratando de disolver o erosionar la superficie metálica y entre más alta sea la velocidad, más efectiva será la remoción de la capa protectora de óxido. En esencia, la capa protectora de óxido se desgasta y deja expuesto el metal (desnudo). A medida que el agua oxigenada continúa pasando sobre la superficie activa, se forma una nueva capa de óxido, sólo para ser nuevamente desgastada. Este ciclo se repite hasta que esencialmente ya no queda ningún espesor de pared y la tubería falla. En la Figura 6 se observa el desgaste del cupón gravimétrico ocasionado por el flujo, lo que indica que es una variable explicativa que influye en el desgaste de las tuberías estudiadas.



Figura 6. Morfología de daño por velocidad de flujo.

La presencia de CO_2 disuelto en agua puede promover corrosión general y/o localizada. El CO_2 se disuelve en agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3) y este ácido puede bajar el pH del

fluido. Sin embargo, los niveles de pH medidos a lo largo de las instalaciones de La Cira Infantas parecen ser bastante neutros. La figura 7 muestra una sección de tubería dónde se puede identificar que la velocidad de corrosión está influenciada por la concentración de CO_2 disuelto.

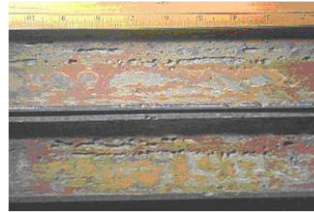


Figura 7. Corrosión por CO_2 de una línea de recolección de hidrocarburos.

Cantidades de trazas de H_2S en el agua pueden ser muy corrosivos. Este es muy soluble en agua y produce un ácido débil. La presencia simultánea de H_2S y oxígeno, a menudo lleva a una corrosión muy severa. El oxígeno y el H_2S reaccionan para formar polisulfuros bajo condiciones ligeramente alcalinas y son extremadamente corrosivos (Ibrahim, Hawboldt, Bottaro, & Khan, 2018). Cuando están presentes el CO_2 y el H_2S en un fluido, la velocidad de corrosión predomina por uno de estos dos componentes. En la recolección de datos se encuentra que el valor máximo de la concentración de sulfuro de hidrógeno es de 7 ppm, siendo este un valor bajo, lo que conlleva a que la velocidad de corrosión predomine por la concentración de CO_2 disuelto.

La corrosión influenciada microbiológicamente (MIC) es una preocupación ampliamente extendida a lo largo de las instalaciones de La Cira Infantas. Típicamente, la inyección de agua se despliega en un yacimiento que contiene petróleo para proporcionar una presión de apoyo y mejorar la recuperación secundaria de petróleo. Sin embargo, si no se monitorea apropiadamente la calidad del agua, puede ser una condición ideal para la proliferación de bacterias. Las bacterias atraviesan el yacimiento y dan como resultado una contaminación bacteriana ampliamente extendida, lo que genera aún más H_2S . La Figura 8 muestra una sección de tubería afectada por bacterias, es por ello por lo que se consideró esta variable explicativa para el modelo estadístico.

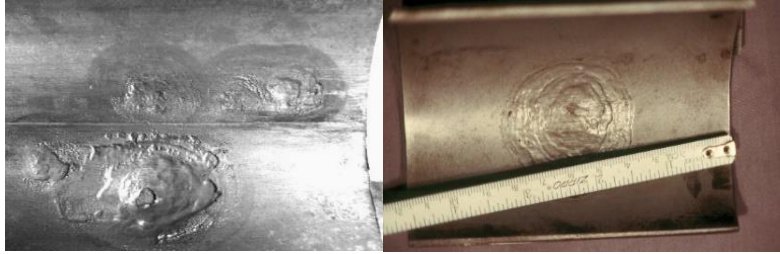


Figura 8. Morfología de los agujeros de corrosión debidos a MIC.

Hay una presencia significativa de sólidos disueltos y suspendidos lo que lleva a corrosión bajo el depósito. Cuando la concentración de ciertos compuestos excede su solubilidad a cierta temperatura, ocurre precipitación en áreas donde las concentraciones son más altas. La formación de incrustaciones puede ofrecer resultados mixtos en un esquema de inyección de agua. Las incrustaciones pueden ser protectoras en contra de la corrosión por O_2 , CO_2 y H_2S , sin embargo, permitir reacciones no controladas de incrustaciones pueden llevar a un aumento en los sólidos disueltos y suspendidos, taponamientos y corrosión bajo depósitos debido a la presencia de depósitos de incrustaciones duras y adheridas.

Otras variables que afectan el proceso de desgaste de tubería como la conductividad, pH, sulfatos y cloruros fueron consideradas para el desarrollo del modelo.

5.3 Desarrollo de correlaciones para la corrosión interna

Las Tablas 3, 4 y 5 presentan el resumen estadístico de las variables velocidad de corrosión, velocidad de flujo y concentración de dióxido de carbono disuelto, las mismas que son estadísticamente significativas para el modelo desarrollado; incluye promedios, desviación estándar, sesgo estandarizado y curtosis estandarizada. De particular interés son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal; valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, para mejorar dichos rangos se analizó las transformaciones (logarítmica, inversa, cuadrática y raíz).

La Tabla 3 muestra el resumen estadístico para la variable velocidad de corrosión. Para el desarrollo del modelo matemático se seleccionó la variable $1/V_{corr}$, que es la que presenta un sesgo estandarizado y una curtosis estandarizada más cercana a 2, en comparación con las demás variables transformadas de la velocidad de corrosión.

Tabla 3.

Análisis multivariable de la velocidad de corrosión

	Vcorr	ln(Vcorr)	1/Vcorr	Vcorr ²	Vcorr ^{1/2}
Recuento	230	230	230	230	230
Promedio	2.75127	-0.300293	2.31625	61.9261	1.15271
Desviación Estándar	7.38878	1.34953	1.68808	351.18	1.1953
Mínimo	0.149821	-1.89832	0.0151597	0.0224462	0.387067
Máximo	65.9645	4.18912	6.67465	4351.31	8.12185
Sesgo Estandarizado	31.9357	7.91139	1.74745	57.8549	18.3239
Curtosis Estandarizada	99.2837	2.80806	-3.15315	318.107	30.9588

La Tabla 4 muestra el resumen estadístico para la variable velocidad de flujo. Para el desarrollo del modelo matemático se seleccionó la variable $V_f^{1/2}$, que es la que presenta un sesgo estandarizado y una curtosis estandarizada en el rango de normalidad, en comparación con las demás variables transformadas de la velocidad de flujo.

Tabla 4.

Análisis multivariable de la velocidad de flujo

	Vf	ln(Vf)	1/Vf	Vf ²	Vf ^{1/2}
Recuento	230	230	230	230	230
Promedio	1.39569	0.00121953	3.23271	2.90686	1.10194
Desviación Estándar	0.98137	0.980421	23.2949	3.78572	0.426877
Mínimo	0.00284444	-5.86239	0.200057	8.0908E-06	0.0533333
Máximo	4.99857	1.60915	351.563	24.9857	2.23575
Sesgo Estandarizado	5.47979	-10.4168	91.2557	14.641	0.541113
Curtosis Estandarizada	1.28468	18.0772	684.402	23.4735	-1.62248

La Tabla 5 muestra el resumen estadístico para la variable concentración de dióxido de carbono disuelto. Para el desarrollo del modelo matemático se seleccionó la variable $\ln(\text{CO}_2)$, que es la que presenta un sesgo estandarizado y una curtosis estandarizada más cercana a 2, en comparación con las demás variables transformadas de la concentración de dióxido de carbono

disuelto, en este caso la variable seleccionada $\ln(\text{CO}_2)$ tiene una curtosis elevada, lo que indica que sus valores están concentrados en la media (Spiegel, M. R., Schiller, 2001).

Tabla 5.

Análisis multivariable de la concentración de dióxido de carbono disuelto

	CO_2	$\ln(\text{CO}_2)$	$1/\text{CO}_2$	CO_2^2	$\text{CO}_2^{1/2}$
Recuento	230	230	230	230	230
Promedio	83.2435	4.15933	0.0206355	16393.5	8.49673
Desviación Estándar	97.4954	0.683375	0.0337123	92799	3.33127
Mínimo	2	0.693147	0.001	4	1.41421
Máximo	1000	6.90776	0.5	1.00E+06	31.6228
Sesgo Estandarizado	45.6859	0.0389549	78.6075	64.9438	19.0058
Curtosis Estandarizada	207.99	11.2136	558.089	340.895	57.6801

El modelo consideró las variables explicativas: velocidad del flujo, concentración de dióxido de carbono disuelto, pH, conductividad, cloruros, sulfatos, bacterias sulfato-reductoras, bacterias productoras de ácido y sólidos. Como variable dependiente se encuentra la velocidad de corrosión.

Sólo las variables dependientes velocidad de flujo y concentración de dióxido de carbono disuelto son estadísticamente significativas, como se presenta en la Tabla 5.5. Si el valor-P o valor de probabilidad es menor que 0.05 significa que las variables de estudio son estadísticamente significativas, caso contrario las variables no son estadísticamente significativas. Las variables no significativas para el modelo se presentan en los anexos B y C.

En la Tabla 6 se observa que el valor-P es menor que 0.05 para las dos variables velocidad de flujo y concentración de dióxido de carbono disuelto, lo que denota que son estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 6.

Parámetros estadísticos de las variables velocidad de flujo y CO₂ disuelto

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
$Vf^{1/2}$	-1.38637	0.241455	-5.74174	0.0000
$\ln(CO_2)$	-0.405111	0.150827	-2.68593	0.0078

La ecuación 4.1 presenta los resultados del modelo ajustado por regresión múltiple que describe la velocidad de corrosión en función de las variables independientes: velocidad de flujo y concentración de dióxido de carbono disuelto.

$$\frac{1}{V_{corr}} = 5.52894 - 1.38637 * Vf^{\frac{1}{2}} - 0.405111 * \ln(CO_2) \quad (Ec. 4.1)$$

Donde:

$V_{corr} \rightarrow$ Velocidad de corrosión, mpy

$Vf \rightarrow$ Velocidad de flujo, ft/s

$CO_2 \rightarrow$ Concentración de dióxido de carbono disuelto, ppm

Los resultados denotan que la variable explicativa velocidad de flujo es la que tiene una mayor significancia (valor-P menor) en el modelo, comparada con la concentración de dióxido de carbono disuelto. Esto se explica debido a que un pequeño cambio de velocidad de flujo aumenta el desgaste en las paredes internas de la tubería.

5.4 Validación correlaciones para la corrosión interna

En esta sección se presenta la comparación de los resultados de la predicción de la velocidad de corrosión realizado con el modelo matemático y los resultados reales obtenidos de los cupones gravimétricos.

Este modelo se evaluó para 40 datos aleatorios considerando las dos variables velocidad de flujo y concentración de dióxido de carbono disuelto. En la Figura 9 se muestra una comparación

de los datos de velocidad de corrosión obtenidos experimentalmente (40 puntos evaluados) y los datos de velocidad de corrosión obtenidos por el modelo anteriormente presentado.

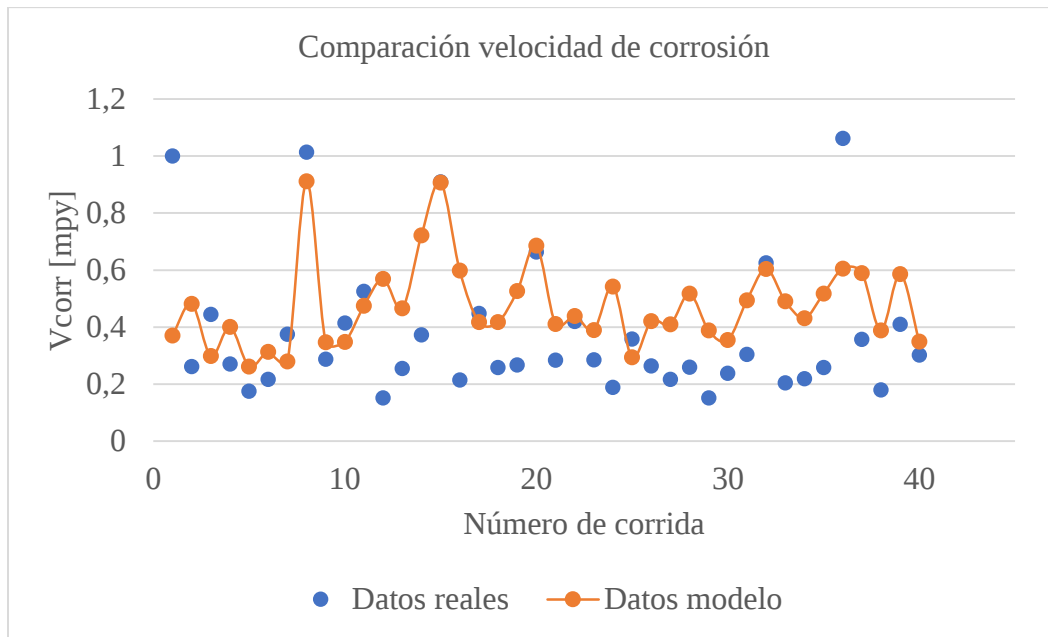


Figura 9. Corrida del modelo en puntos específicos.

La validación se llevó a cabo con los análisis de varianza y análisis de medias.

Para determinar si las medias de la velocidad de corrosión real y de la velocidad de corrosión calculada difieren o no significativamente una de la otra, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) (Statgraphics, 2007a). Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Tabla ANOVA para la velocidad de corrosión real y calculada

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.10242	1	0.10242	1.41	0.2389
Intra grupos	5.67094	78	0.0727044		
Total (Corr.)	5.77337	79			

La tabla divide la variabilidad que existe en las mediciones de velocidad de corrosión entre dos componentes: un componente "Intra grupos", que mide la variabilidad de la velocidad de

corrosión de cada nivel y un componente “Entre grupos” que mide la variabilidad de las dos velocidades de corrosión (real y calculada).

De particular importancia es la razón-F, que prueba la hipótesis de que la respuesta media para los dos niveles de la velocidad de corrosión es la misma; formalmente, prueba la hipótesis nula

$$H_0: \mu (\text{Vcorr experimental}) = \mu (\text{Vcorr calculada})$$

Versus la hipótesis alterna

$$H_1: \mu (\text{Vcorr experimental}) \neq \mu (\text{Vcorr calculada})$$

Si la razón-F es lo suficientemente grande, se rechaza la hipótesis nula. La significancia estadística de la razón-F es mucho más fácil de juzgar por su valor-P. Si el valor-P es mayor que 0.05, la hipótesis nula de medias iguales se acepta al nivel de significancia del 5%, lo cual indica que en este caso se acepta dicha hipótesis ya que el valor-P es de 0.2389, es decir, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las velocidades de corrosión.

En la Tabla 8 se presenta la media de cada nivel junto con un intervalo de incertidumbre. El tipo de intervalo utilizado es LSD, diseñado para comparar las medias de las velocidades de corrosión con el nivel de confianza de 95%

Tabla 8.

Tabla de medias para la velocidad de corrosión con intervalos de confianza del 95%

	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Vcorr exp	40	0.405709	0.0426334	0.345692	0.465726
Vcorr cal	40	0.477271	0.0426334	0.417254	0.537288
Total	80	0.44149			

La Figura 10 muestra el gráfico de medias para la velocidad de corrosión experimental y calculada junto con los intervalos de incertidumbre, donde se observa que los intervalos se

traslapan, esto quiere decir que no hay una diferencia significativa entre las medias al nivel de confianza del 95%(Gutiérrez Pulido & Salazar, 2008).

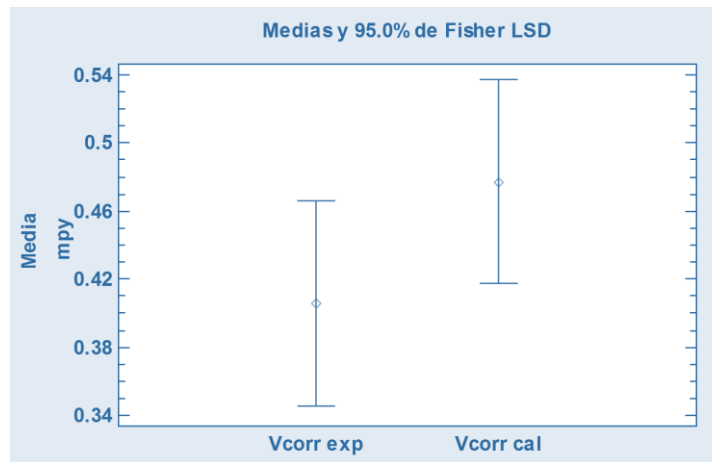


Figura 10. Gráfico de medias para la velocidad de corrosión con intervalos de confianza del 95%

La Figura 11 muestra que los resultados predichos por los modelos De Waard93, De Waard95 y Norsok difieren significativamente de los datos experimentales, mientras que el modelo CIC y el modelo de correlación estadística (desarrollado en este trabajo) se ajustan satisfactoriamente al comportamiento de los datos.

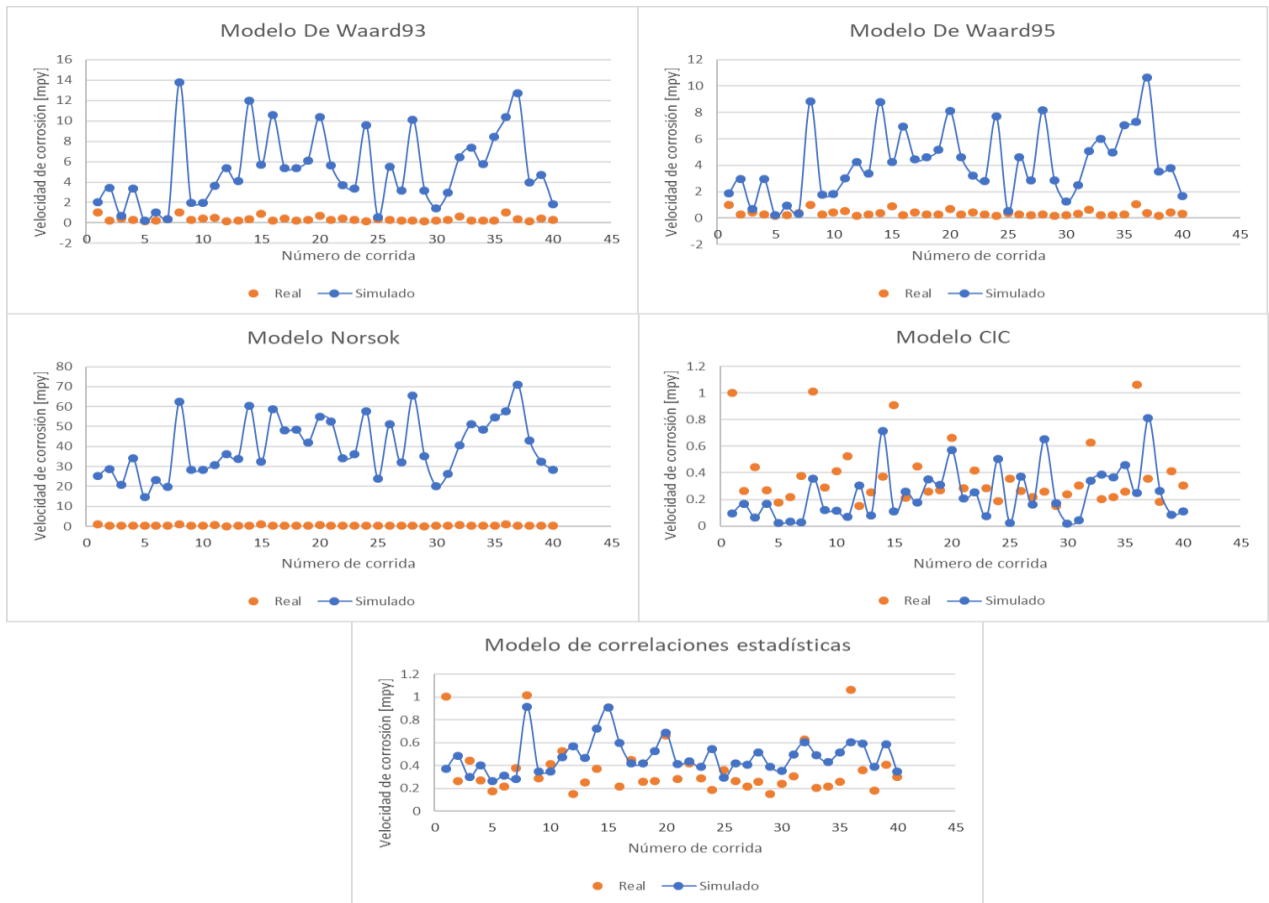


Figura 11. Comparación entre velocidades de corrosión experimentales y simuladas para líneas de recolección de hidrocarburos versus el número de corrida para el pozo donde se evaluó la corrosión.

De igual manera, este comportamiento se confirma al graficar datos predichos vs datos experimentales (Ver Figura 12). Se observa que la mayoría de los datos para los modelos De Waard93, De Waard95 y Norsok no se ubican sobre la curva de ajuste exacta de pendiente uno (1), lo cual indica que estos modelos presentan una capacidad de predicción muy restringida para describir el comportamiento de la velocidad de corrosión obtenida con cupones gravimétricos. Por otro lado, para el modelo CIC y para el modelo de correlación, los datos se ubican más sobre la curva de ajuste, demostrando una mejor predicción.

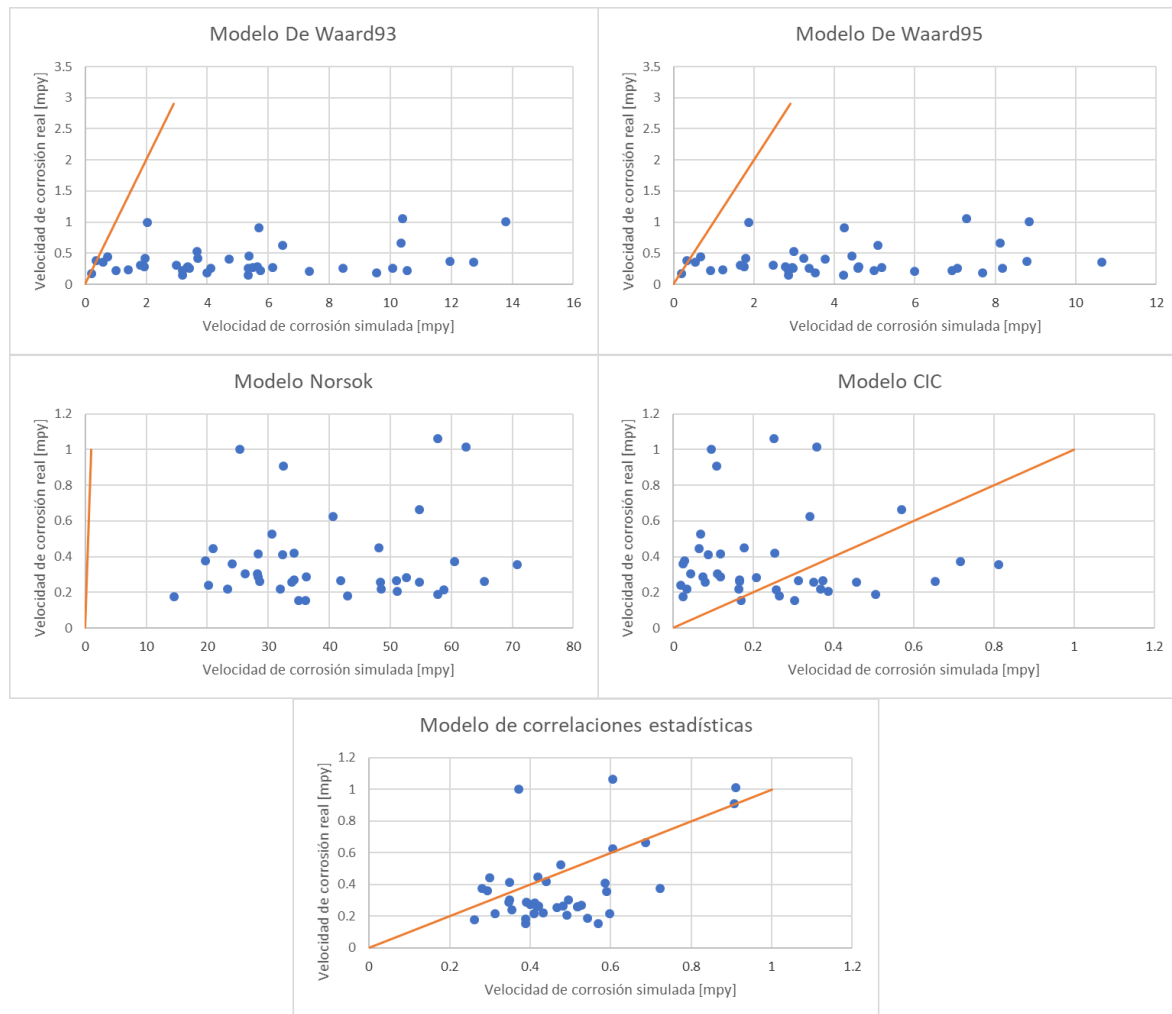


Figura 12. Correlación entre las velocidades de corrosión simulada por los modelos y los datos reales para las líneas de recolección de hidrocarburos.

La Tabla 9 presenta los resultados de parámetros estadísticos usados para evaluar la capacidad predictiva de los modelos. Se observa que los modelos CIC y la correlación estadística tienen una mejor capacidad de predicción que los modelos De Waard93, De Waard95 y Norsok, presentando un error relativo medio inferior al 70%. Adicionalmente, el estadístico ECM muestra que los residuales promedios para los modelos CIC y la correlación estadística son moderadamente pequeños comparados con respecto a los valores de los otros modelos. De esta manera, el modelo de correlación propuesto puede ser considerado una alternativa confiable y

adecuada para explicar la variabilidad de la velocidad de corrosión obtenida en las líneas de recolección de hidrocarburos del campo La Cira Infantas.

Tabla 9.

Consolidado de parámetros estadísticos en la evaluación de la capacidad de predicción de los modelos de corrosión.

Modelo de corrosión	% Error relativo medio	Error cuadrático medio	R-cuadrado
Waard 93	1578.937	5.976	0.0800
Waard 95	1264.472	4.572	0.0443
Norsok	13359.861	41.990	0.0128
CIC	69.330	0.339	0.0001
Correlaciones	65.683	0.226	0.2715

6. Conclusiones

Se desarrolló una base de datos con información operacional, de diseño, composición del fluido, monitoreo e inspección necesario para evaluar procesos de corrosión en las líneas de recolección de hidrocarburos del campo La Cira Infantas.

Se determinaron las variables de mayor aporte en procesos de corrosión de acuerdo con los mecanismos que afectan el desgaste de las líneas de recolección de hidrocarburos del campo La Cira Infantas, entre las que se encuentran: velocidad de flujo, dióxido de carbono disuelto, sulfuro de hidrógeno disuelto, pH, conductividad, concentración de cloruros, concentración de sulfatos, bacterias sulfato reductoras, bacterias productoras de ácido y concentración de sólidos.

Se desarrolló un modelo basado en correlaciones estadísticas para la predicción de corrosión interna a través de análisis multivariable y regresión múltiple de variables explicativas o independientes. El modelo se desarrolló con la variable dependiente: velocidad de corrosión y las

variables independientes: velocidad de flujo y concentración de dióxido de carbono disuelto, que resultaron ser estadísticamente significativas, así mismo, se descartó las variables: pH, conductividad, concentración de cloruros, concentración de sulfatos, cantidad de bacterias sulfato reductoras, cantidad de bacterias productoras de ácido y concentración de sólidos, debido a que no fueron estadísticamente significativas.

Se realizó un análisis de varianza para comparar medias donde se planteó como hipótesis nula que la media de la velocidad de corrosión del nivel de estudio real determinado por gravimetría es igual a la media de la velocidad de corrosión determinada por el modelo, obteniendo que estadísticamente se puede aceptar la hipótesis nula ya que se obtuvo un valor-P de 0.2389, el cual está en la zona de aceptación para un nivel de confianza del 95%.

7. Recomendaciones

Recopilar información a lo largo de la tubería para evaluar la velocidad de corrosión en diferentes puntos donde el ángulo de inclinación es importante ya que se puede acumular agua y sólidos, lo que conlleva a un aumento de la velocidad de corrosión.

Optimizar el modelo matemático planteado, con el fin de que un mayor número de variables sean consideradas como significativas, esto se puede lograr recopilando más información de un mismo lugar para comprobar la variabilidad de los datos.

Referencias bibliograficas

- Biomorgi, J., Hernández, S., Marín, J., Rodriguez, E., Lara, M., & Vilorio, A. (2012). Internal corrosion studies in hydrocarbons production pipelines located at Venezuelan Northeastern. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(9), 1159–1167.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.12.013>
- Fuentes, C., & Peña, D. (2007). Predicción de la corrosión por CO₂ + H₂S en tuberías de acero al carbono. *Scientia et Technica*, (36), 881–886.
- Gutiérrez Pulido, H., & Salazar, R. de la V. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (2a. edición). México.
- Ibrahim, A., Hawboldt, K., Bottaro, C., & Khan, F. (2018). Review and analysis of microbiologically influenced corrosion: the chemical environment in oil and gas facilities. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, (October), 1–15.
<https://doi.org/10.1080/1478422X.2018.1511326>
- Moghissi et al. (2008). *Internal Corrosion Direct Assessment Methodology for Liquid Petroleum Pipelines. Distribution*. Retrieved from <https://www.nace.org/cstm/Store/Product.aspx?id=f3464900-94b1-dd11-88e1-0017a446694e>
- Nešić, S. (2007). Key issues related to modelling of internal corrosion of oil and gas pipelines - A review. *Corrosion Science*, 49(12), 4308–4338.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.06.006>
- Ngan, K. . (2010). Phase Inversion in dispersed liquid-liquid pipe flow Kwun Ho Ngan. *Chemical Engineering*, (October), 1–232.
- Revie, R., & Uhlig, H. (2008). Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion

- science and engineering (Uhlig, Herbert H.). *Journal of Chemical Education*, 41(2), A126.
<https://doi.org/10.1021/ed041pA126.5>
- Reyes Cruz, V. E., Veloz Rodríguez, M. A., & Esparza Zúñiga, E. M. (2012). Efecto del pH en la corrosión de acero al carbono en presencia de un medio amargo, 25(2), 439–447.
- Roberge, P. R., San, N. Y., Washington, F., Auckland Bogotá, D. C., Lisbon, C., Madrid, L., ... Singapore, J. (2000). *Handbook of Corrosion Engineering McGraw-Hill*. Retrieved from <https://www.cntq.gob.ve/cdb/documentos/quimica/197.pdf>
- Spiegel, M. R., Schiller, J. J. y S. (2001). *Teoría y problemas de probabilidad y estadística*. (McGraw-Hill & Interamericana, Eds.) (2nd ed.). Bogotá.
- Statgraphics. (2007a). Análisis de varianza (ANOVA), 1–24.
- Statgraphics. (2007b). Regresión múltiple, 1–32.
- Statgraphics. (2015). Análisis Multivariable, (2007), 1–19.
- Xie, M., & Tian, Z. (2018). A review on pipeline integrity management utilizing in-line inspection data. *Engineering Failure Analysis*, 92(November 2017), 222–239.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.05.010>

Apéndices

Apéndice A.Base de datos

La Tabla 10 presenta una base de datos para la recopilación de la información donde se encuentra la fisicoquímica del fluido, el volumen producido, las condiciones operacionales, la concentración de sólidos y las velocidades de corrosión.

Tabla 10.

Plantilla para la recopilación de la información

		Fisicoquímica del Agua													
Serpentina	Pozo	CO2 Disuelto [ppm]	H2S Disuelto [ppm]	pH	Conductividad [uS/cm]	Cloruros [mg/L]	Sulfatos [mg/L]	Alcalinidad [mg CaCO3]	Bicarbonatos [mg CaCO3]	Sulfuros [mg/L]	SDT [mg/L]	Hierro Total [mg/L]	Hierro Soluble [mg/L]	Magnesio [mg/L]	
SS 41A	2211	70	0.1	7.19	22750	10634	< 10.0	545	545	< 1.00	20633	15.74	0.15	252	
SS 41A	2941	30	0.1	7.222	22800	10594	< 10.0	515	515	1.2	21667	19.32	0.22	264.95	
SS 41B	2970	110	0.1	7.44	20240	9591	< 10.0	648	648	< 1.00	18900	10.41	0.85	475	
Col 101	1157	40	0	7.468	40110	10373	< 10	405	405	< 1.00	36099	13.66	0.46	82.48	
Col 104	787	30	0	7.304	25960	12460	< 10	393	393	2	24767	5.26	0.22	275.55	
Col 111	1809	25	0	7.533	29800	7024	< 10	376	376	< 1.00	26820	8.28	0.29	67.72	
Col 122	1022	35	0	7.069	30320	15249	< 10	328	328	< 1.00	35900	8.12	0.25	254.95	
COL 148	1575	2	0	7.995	35800	16416	< 10	1999	1999	3.6	30700	0.15	0.3	196.6	
Col 155A Z	1866	30	N D	6.476	24740	14000	< 10	63.8	63.8	< 1.00	29900	44.14	2.78	170.6	
Col 99	724	50	0.1	6.789	20420	9792	< 10.0	453	453	1.2	19633	6.27	0.2	176.6	
ETAPA 1	2936	50	0	8.074	19260	6435	< 10	1552	1552	3.2	11900	7.08	0.02	217.32	
ETAPA 1	5048	40	0	6.964	36200	18663	< 10	434	434	1.36	32580	12.34	0.41	423.2	
ETAPA 1	5099	50	0.1	7.148	21260	9242	< 10	687	687	< 1.00	19134	17.62	0.35	304.15	
ETAPA 1	5050	60	N D	7.708	31120	14701	< 10	870	870	< 1.00	28008	18.82	14.86	523.1	
ETAPA 1	2123	70	N D	7.33	30700	13180	< 10	737	737	2.8	27630	3.42	1.47	333.9	
SS 1	358	105	1.5	7.366	26360	12119	16.08	481	481	16.4	22867	13.24	0.2	23.1	
SS 1	2476	45	0.6	7.551	25850	12320	< 10	639	639	5.2	22133	29.41	0.16	300.15	
SS 1	2453	40	1	7.584	31720	15610	32.3	766	766	< 1.00	30167	8.62	0.36	439.5	
SS 10	242	200	0.4	6.887	37480	19575	< 10	769	769	1.2	33732	4.32	0.61	444.55	

Apéndice B. Análisis multivariable

En la presente sección se presenta los análisis multivariantes de todas las variables de estudio a excepción de las variables estadísticamente significativas que fueron presentadas en la sección 5.3. La Tabla 11 muestra el resumen estadístico para la variable pH. Para el desarrollo del modelo matemático se seleccionó la variable pH^2 , que es la que presenta un sesgo estandarizado y una curtosis estandarizada más cercana a 2, en comparación con las demás variables transformadas de pH.

Tabla 11.

Análisis multivariable para el pH

	pH	ln(pH)	1/pH	pH^2	$\text{pH}^{1/2}$
Recuento	230	230	230	230	230
Promedio	7.21897	1.97574	0.138803	52.2105	2.68617
Desviación Estándar	0.311935	0.0449007	0.00656044	4.38793	0.0590735
Mínimo	5.148	1.63861	0.120048	26.5019	2.26892
Máximo	8.33	2.11986	0.19425	69.3889	2.88617
Sesgo Estandarizado	-8.03684	-12.354	17.8375	-4.62852	-10.0652
Curtosis Estandarizada	26.7615	42.9074	68.6537	17.2922	33.8304

La Tabla 12 muestra el resumen estadístico para la variable conductividad. Para el desarrollo del modelo matemático se seleccionó la variable $1/\text{cond}$, que es la que presenta un sesgo estandarizado y una curtosis estandarizada más cercana a 2, en comparación con las demás variables transformadas de la conductividad.

Tabla 12.

Análisis multivariable para la conductividad.

	cond	ln(cond)	1/cond	cond^2	$\text{cond}^{1/2}$
Recuento	230	230	230	230	230
Promedio	26955	10.1754	3.90113E-05	7.72E+08	163.063
Desviación Estándar	6732.07	0.224054	8.25929E-06	4.54E+08	19.1596
Mínimo	13650	9.52149	1.52625E-05	1.86E+08	116.833
Máximo	65520	11.0901	7.32601E-05	4.29E+09	255.969
Sesgo Estandarizado	11.2125	4.59766	1.40233	20.8471	7.67353
Curtosis Estandarizada	17.7137	4.41006	4.94101	57.1719	8.88132

La Tabla 13 muestra el resumen estadístico para la variable cloruros. Para el desarrollo del modelo matemático se seleccionó la variable $\ln(\text{Cl}_s)$, que es la que presenta un sesgo estandarizado y una curtosis estandarizada más cercana a 2, en comparación con las demás variables transformadas de cloruros.

Tabla 13.

Análisis multivariable para los cloruros.

	Cl_s	$\ln(\text{Cl}_s)$	$1/\text{Cl}_s$	Cl_s^2	$\text{Cl}_s^{1/2}$
Recuento	230	230	230	230	230
Promedio	12108.5	9.359	8.98879E-05	1.61E+08	108.855
Desviación Estándar	3802.95	0.289652	2.76006E-05	1.26E+08	16.1305
Mínimo	4594	8.43251	2.73396E-05	2.11E+07	67.7791
Máximo	36577	10.5072	0.000217675	1.34E+09	191.251
Sesgo Estandarizado	12.2543	0.457707	10.6018	29.366	6.0168
Curtosis Estandarizada	26.2951	6.53278	17.7968	111.479	11.0942

La Tabla.14 muestra el resumen estadístico para la variable sulfatos. Para el desarrollo del modelo matemático se seleccionó la variable $1/\text{SO}_4$, que es la que presenta un sesgo estandarizado y una curtosis estandarizada más cercana a 2, en comparación con las demás variables transformadas de sulfatos.

Tabla 14.

Análisis multivariable para los sulfatos.

	SO_4	$\ln(\text{SO}_4)$	$1/\text{SO}_4$	SO_4^2	$\text{SO}_4^{1/2}$
Recuento	230	230	230	230	230
Promedio	11.6977	2.35396	0.0972657	367.918	3.29579
Desviación Estándar	15.2345	0.288898	0.0131517	3520.96	0.916051
Mínimo	10	2.30259	0.004329	100	3.16228
Máximo	231	5.44242	0.1	53361	15.1987
Sesgo Estandarizado	82.6681	46.5435	-32.353	93.0142	65.3695
Curtosis Estandarizada	588.448	205.202	84.7328	702.698	397.964

La Tabla 15 muestra el resumen estadístico para la variable bacterias sulfato-reductoras, cabe resaltar que no se transformó esta variable a logaritmo y a inversa, debido a la naturaleza de los datos. Para el desarrollo del modelo matemático se seleccionó la variable $\text{BSR}^{1/2}$, que es la que

presenta un sesgo estandarizado y una curtosis estandarizada más cercana a 2, en comparación con las demás variables transformadas de BSR.

Tabla 15.

Análisis multivariable para las bacterias sulfato-reductoras.

	BSR	BSR²	BSR^{1/2}
Recuento	230	230	230
Promedio	386.009	2.70E+06	9.74434
Desviación Estándar	1601.62	1.60E+07	17.0976
Mínimo	0	0	0
Máximo	10000	1.00E+08	100
Sesgo Estandarizado	35.3669	37.04	24.9164
Curtosis Estandarizada	98.7041	105.561	56.1168

La Tabla 16 muestra el resumen estadístico para la variable bacterias productoras de ácido, cabe resaltar que no se transformó esta variable a logaritmo y a inversa, debido a la naturaleza de los datos. Para el desarrollo del modelo matemático se seleccionó la variable $BPA^{1/2}$, que es la que presenta un sesgo estandarizado y una curtosis estandarizada más cercana a 2, en comparación con las demás variables transformadas de BPA.

Tabla 16.

Análisis multivariable para las bacterias productoras de ácido.

	BPA	BPA²	BPA^{1/2}
Recuento	230	230	230
Promedio	312.809	2.64E+06	6.94052
Desviación Estándar	1598.14	1.60E+07	16.3032
Mínimo	0	0	0
Máximo	10000	1.00E+08	100
Sesgo Estandarizado	36.4241	37.0521	30.9543
Curtosis Estandarizada	103.002	105.609	79.5192

La Tabla 17 muestra el resumen estadístico para la variable concentración de sólidos. Para el desarrollo del modelo matemático se seleccionó la variable $\ln(\text{solid})$, que es la que presenta un

sesgo estandarizado y una curtosis estandarizada más cercana a 2, en comparación con las demás variables transformadas de concentración de sólidos.

Tabla 17.

Análisis multivariable para la concentración de sólidos.

	solid	ln(solid)	1/solid	solid²	solid^{1/2}
Recuento	230	230	230	230	230
Promedio	72.7018	2.73215	0.126633	257252	5.20397
Desviación Estándar	503.057	1.3411	0.141592	3.62E+06	6.76902
Mínimo	0.96	-0.040822	0.000135146	0.9216	0.979796
Máximo	7399.43	8.90916	1.04167	5.48E+07	86.0199
Sesgo Estandarizado	85.564	5.16929	14.9604	93.3114	52.1692
Curtosis Estandarizada	617.41	4.49923	28.0953	705.81	287.674

Apéndice C. Parámetros estadísticos de las variables no significativas del modelo

Se presentan los parámetros estadísticos de las variables no significativas para el modelo. La significancia de las variables se realizó bajo el criterio del valor-P. Si el valor-P es mayor que 0.05 significa que las variables de estudio son no estadísticamente significativas.

La Tabla 18 muestra las variables descartadas por el modelo de regresión múltiple: cloruros, concentración de sólidos, bacterias productoras de ácidos, bacterias sulfato reductoras, sulfatos, pH y conductividad, las mismas que se presentan en el orden de eliminación, desde la menos a la más significativa, realizado por el método de los mínimos cuadrados.

Tabla 18.

Parámetros estadísticos de las variables descartadas.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
ln(CIs)	-0.06355	0.572177	-0.111067	0.9117
ln(solid)	-0.0254357	0.0792961	-0.320768	0.7487
BPA^{1/2}	0.00261502	0.00719107	0.363648	0.7165
BSR^{1/2}	-0.00244748	0.00667014	-0.36693	0.714
1/SO₄	11.3103	8.01375	1.41136	0.1596
pH²	0.039281	0.0257599	1.52489	0.1287
1/cond	-36175.3	20406.5	-1.77273	0.0777