



**Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química**



TRABAJO ESPECIAL DE GRADO II

MODELADO DE MÉTODOS PREDICTIVOS DE FORMACIÓN DE INCRUSTACIONES EN TUBERÍAS CON FLUJO DE AGUA DE PRODUCCIÓN

Tutor:

Prof. Francisco Yáñez

Presentado por:

Br. Ortega G. Dayenni

Ciudad Universitaria, Mayo de 2010

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

- Planteamiento del Problema
- Objetivos
 - Objetivo General
 - Objetivos Específicos

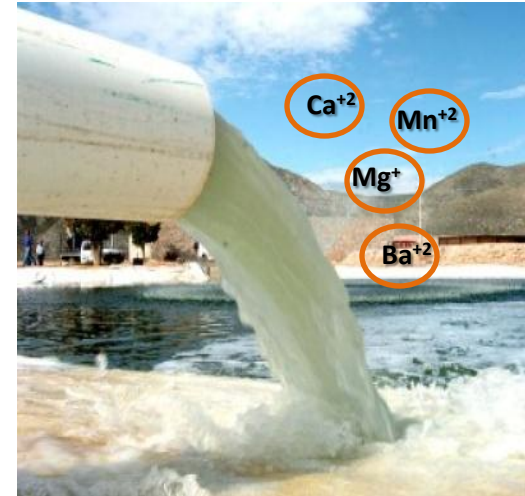
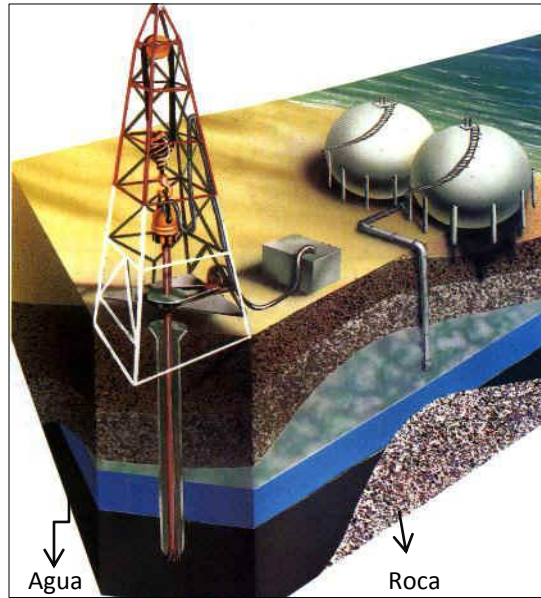
CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

**MODELOS
PREDICTIVOS**



- Langelier
- Ryznar
- Puckorius
- Stiff - Davis
- Oddo - Tomson

Grado de sobresaturación

Temperatura

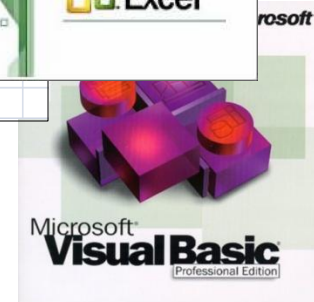
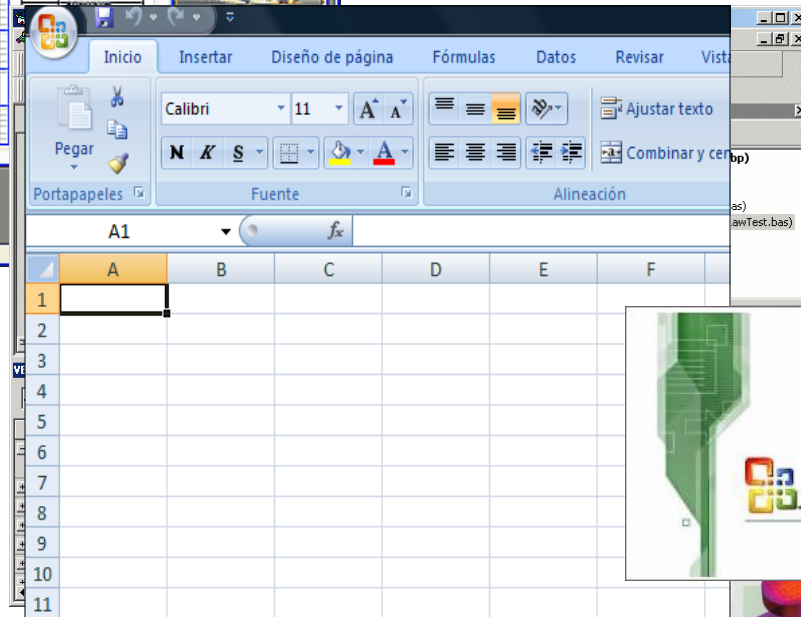
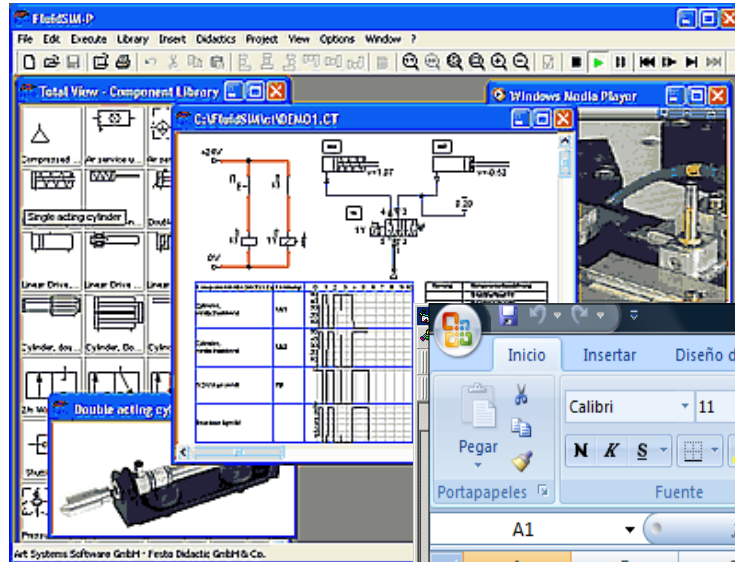
Solubilidad

pH

Alcalinidad

Dureza

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



OBJETIVO GENERAL

Realizar un modelo de ecuaciones que permitan la simulación de la formación de incrustaciones en tuberías con flujo de agua de producción, basados en modelos predictivos

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el estudio bibliográfico de las ecuaciones predictivas de incrustaciones existentes y las metodologías que permitan la programación de las mismas.
- Establecer los diferentes parámetros fisicoquímicos relacionados con la formación de incrustaciones.
- Desarrollar unidades de cálculo de índices de incrustación o modelos de simulación de fácil acceso y manejo, mediante el uso del paquete comercial Excel basado en Visual Basic.

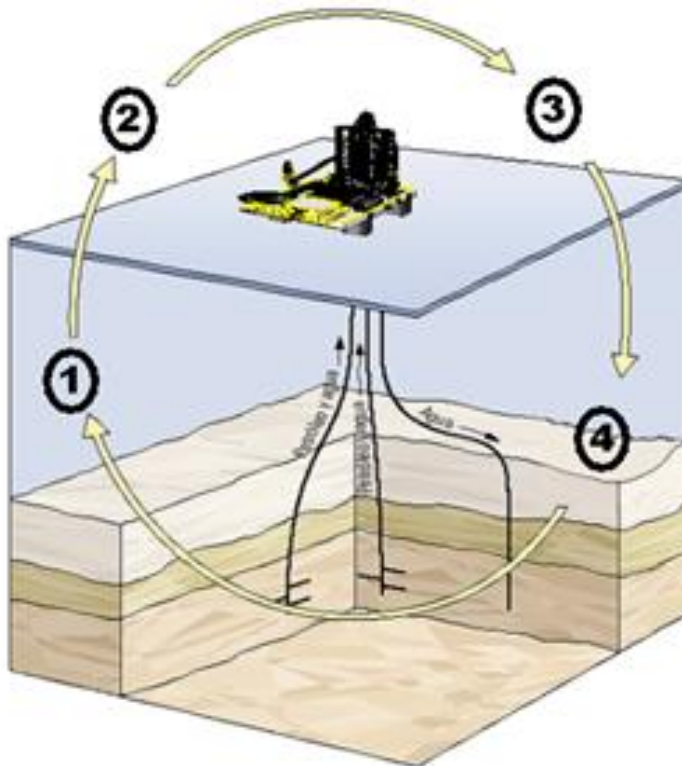
- Calcular los índices de incrustación para cada modelo utilizando datos experimentales y de campo
- Analizar la sensibilidad de los índices de incrustaciones, variando los parámetros incluidos en cada ecuación seleccionada.
- Determinar el método óptimo de predicción de las incrustaciones.
- Calcular los índices de incrustación para cada modelo.
- Generar un sistema de uso práctico que mediante la simulación permita la predicción de incrustaciones.
- Determinación del área de incrustación en el tiempo.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

AGUAS DE PRODUCCIÓN

Aguas de Formación

Aguas de Inyección



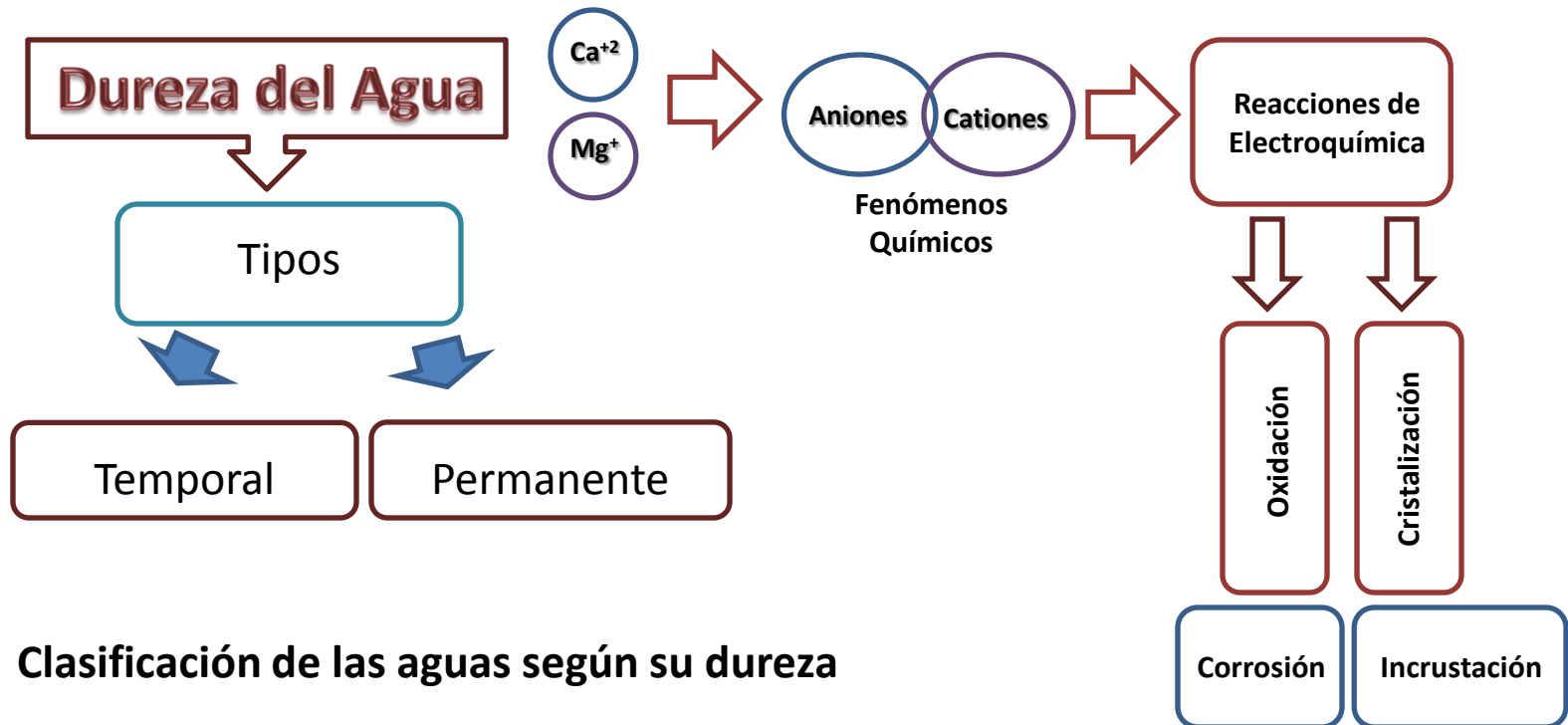
1.- El agua impulsa la producción de petróleo

2.- El petróleo es separado del agua

3.-El agua es sometida a tratamiento antes de su reinyección o eliminación

4.-Una parte del agua producida es reinyectada con fines de inundación artificial

FUNDAMENTOS TEÓRICOS



Clasificación de las aguas según su dureza

Tipo de agua	ppm
Muy suaves	0-15
Suaves	16-75
Medias	76-150
Duras	151-300
Muy duras	Mayor a 300

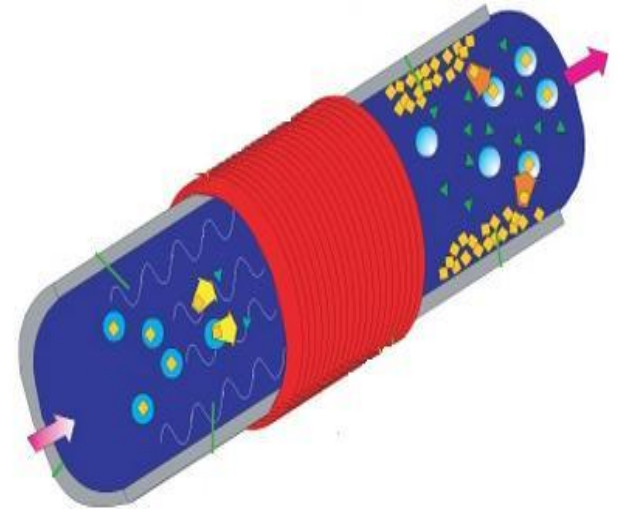
Incrustaciones

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Incrustaciones

Depósitos
sólidos

- Poseen conductividad térmica muy baja.
- Se forman con mucha rapidez, en puntos de mayor transferencia de calor.
- Reduce el diámetro efectivo.
- Aumento de presión interna.



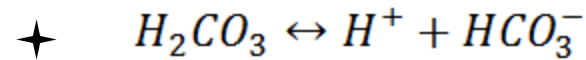
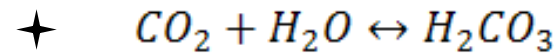
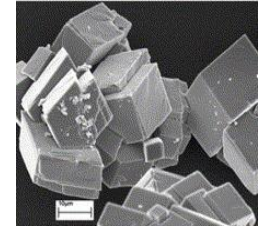
Tipos de incrustaciones



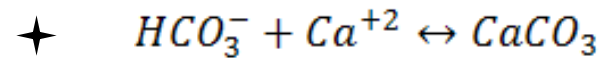
- Sulfato de calcio
- Oxido Férrico
- Sulfato de Bario
- Sulfato de Estroncio
- Carbonato de Calcio

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Reacciones de formación del Carbonato de Calcio



pH 4,5



pH 7,6



FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Factores que afectan la precipitación de carbonato de calcio

Efectos de la concentración

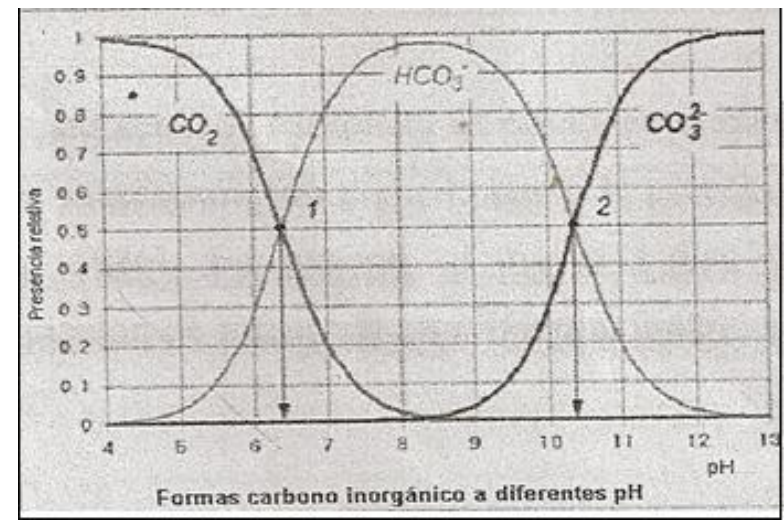
↑ Concentración de carbonato de calcio

↑ Precipitaciones de Carbonato de calcio

Efectos del pH

↓ pH

↓ Precipitaciones de Carbonato de calcio





Efectos de la temperatura

↑ Temperatura



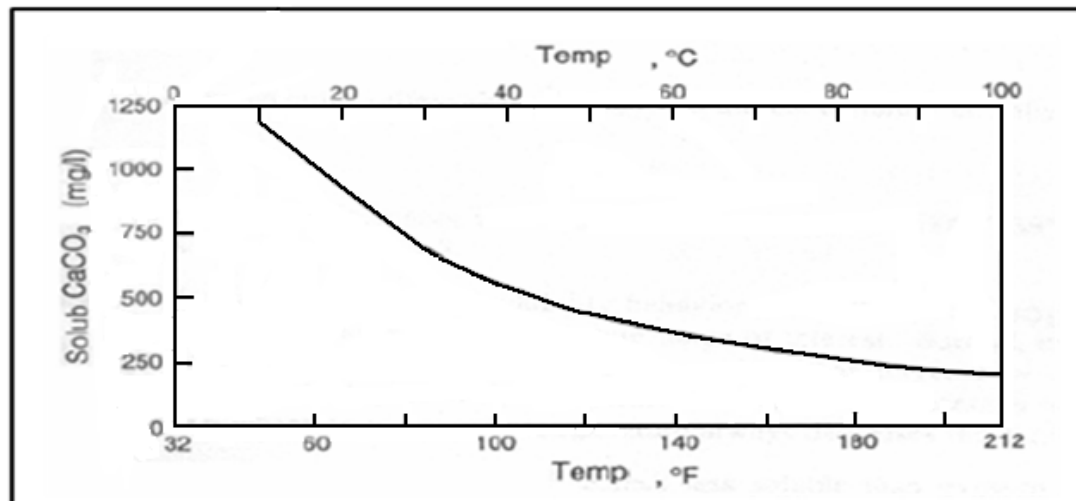
Solubilidad de Dióxido de Carbono



pH



Solubilidad de Carbonato de calcio

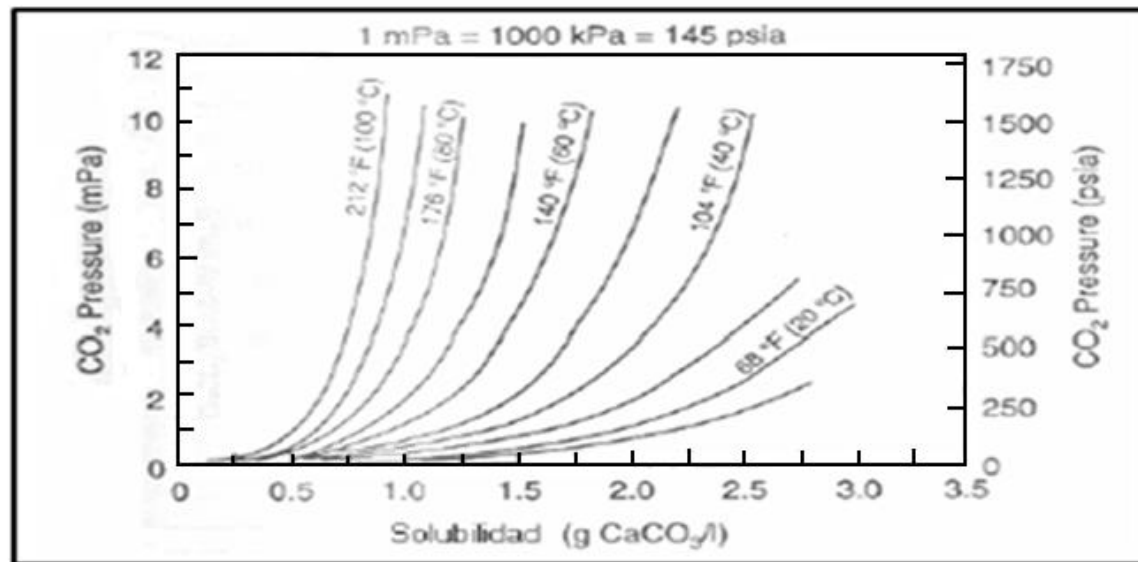


FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Efectos de la presión

↑ Presión

↓ Precipitaciones de carbonato de calcio



FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Modelos predictivos de incrustaciones



Índices de saturación

ÍNDICE DE LANGELIER

$$LS = pH - \textcircled{pH_s}$$

$$pH_s = pCa + pAlk - pk$$

$$\frac{[Ca^{++}] \times [HCO_3^-]}{[H^+]} = k$$

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Índices de Estabilidad de Ryznar

$$RSI = 2pH_s - pH$$

Índices de Escala de Puckorius

$$PSI = 2pH_{eq} - pH_s$$

Índices de Stiff y Davis

$$SI = pH - pH_s$$

Índices de Oddo y Thomsom

$$Is = \log \left[\frac{(Ca^{2+})(HCO_3^-)^2}{C_{aq}^{CO_2}} \right] + 3,63 + 8,68 \times 10^{-3}T + 8,55 \times 10^{-6}T^2 - 6,56 \times 10^{-5}p - 3,42(\mu)^{\frac{1}{2}} + 1,373(\mu)$$

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Modelado y Simulación

Formulación del Modelo



Resolución y Validación del Modelo

Formulación del Modelo

- Identificar las variables de decisión
- Identificar y/o fijar las restricciones
- Definición de los objetivos
- Análisis de la Información Disponible

Resolución y Validación del Modelo



Programación con Excel, Macros y Visual Basic

MARCO METODOLÓGICO

1. Revisión Bibliográfica



2. Estudio de las variables



- Datos de agua de producción experimentales
Xuxangela López y José Rojas
- Datos de agua de producción de campo
Cortes de agua costa afuera

MARCO METODOLÓGICO

1. Revisión Bibliográfica



2. Estudio de las variables

MARCO METODOLÓGICO

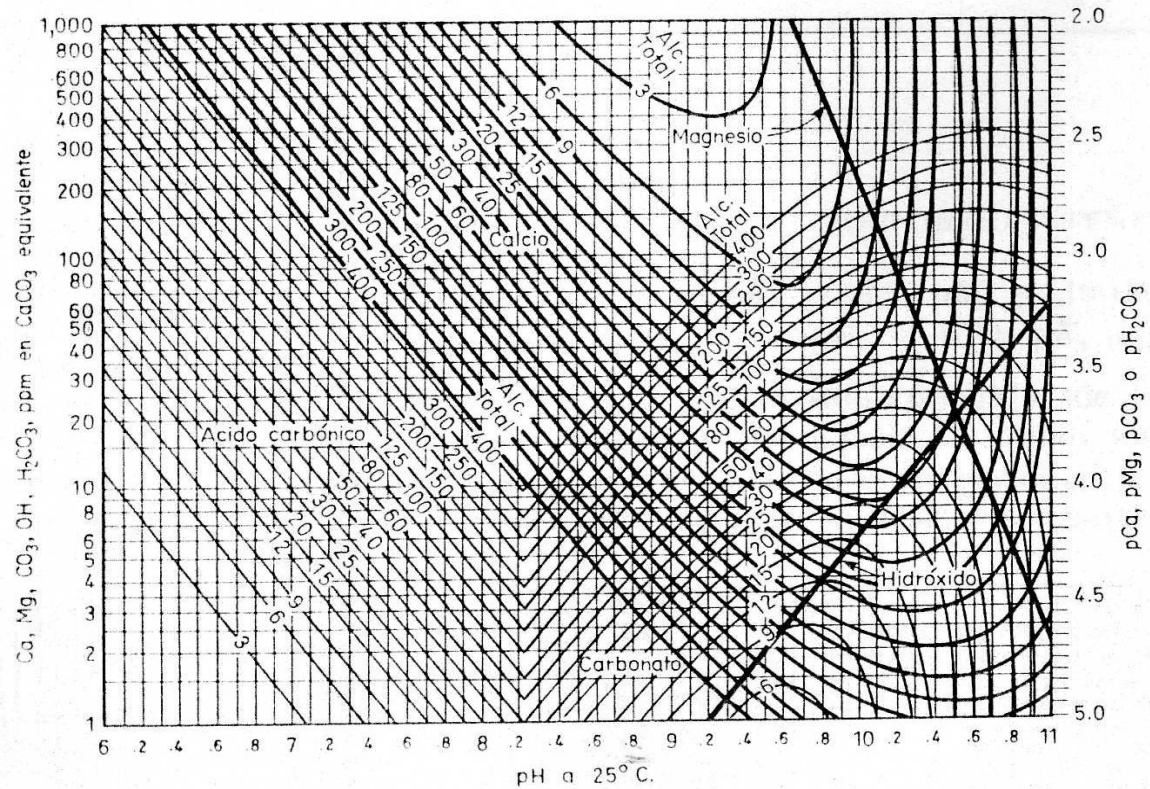


Diagrama de estabilidad de Langelier a 25°C

MARCO METODOLÓGICO

Presión parcial de dióxido de carbono en función de la fuerza iónica molar (Bower, 1953)

μ	PCO ₂									
	10-3.5	10-3.0	10-2.5	10-2.2	10-2.0	10-1.5	10-1.2	10-1.0	10-0.5	10 0
0,001	0,09	0,59	1,09	1,39	1,59	2,09	2,39	2,59	3,09	3,59
0,002	0,14	0,64	1,14	1,44	1,64	2,14	2,44	2,64	3,14	3,64
0,005	0,2	0,70	1,2	1,5	1,7	2,2	2,5	2,7	3,2	3,7
0,007	0,23	0,73	1,23	1,53	1,73	2,23	2,53	2,73	3,23	3,73
0,01	0,27	0,77	1,27	1,57	1,77	2,27	2,57	2,77	3,27	3,77
0,02	0,35	0,85	1,35	1,65	1,85	2,35	2,65	2,85	3,35	3,85
0,03	0,42	0,92	1,42	1,72	1,92	2,42	2,72	2,92	3,42	3,92
0,04	0,46	0,96	1,46	1,76	1,96	2,46	2,76	2,96	3,46	3,96
0,05	0,5	1,00	1,5	1,8	2	2,5	2,8	3	3,5	4
0,07	0,57	1,07	1,57	1,87	2,07	2,57	2,87	3,07	3,57	4,07
0,10	0,64	1,14	1,64	1,94	2,14	2,64	2,94	3,14	3,64	4,14
0,15	0,72	1,22	1,72	2,02	2,22	2,72	3,02	3,22	3,72	4,22
0,20	0,78	1,28	1,78	2,08	2,28	2,78	3,08	3,28	3,78	4,28
0,25	0,83	1,33	1,83	2,13	2,33	2,83	3,13	3,33	3,83	4,33
0,30	0,87	1,37	1,87	2,17	2,37	2,87	3,17	3,37	3,87	4,37
0,40	0,92	1,42	1,92	2,22	2,42	2,92	3,22	3,42	3,92	4,42
0,50	0,96	1,46	1,96	2,26	2,46	2,96	3,26	3,46	3,96	4,42

MARCO METODOLÓGICO

1. Revisión Bibliográfica



2. Estudio de las variables



3. Programación de los Modelos



4. Comparación de los modelos



5. Validación de los modelos

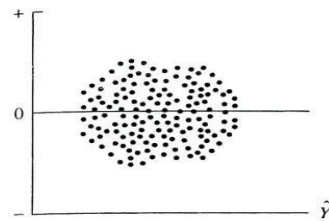
MARCO METODOLÓGICO

6. Estudio de sensibilidad

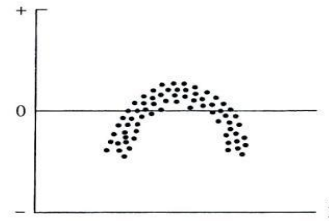


7. Selección del modelo

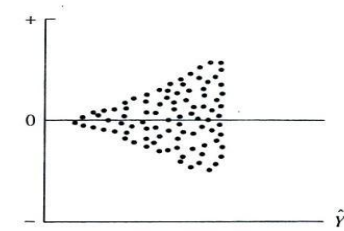
MARCO METODOLÓGICO



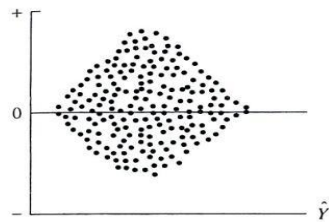
(a) Gráfico de no correlación de residuos



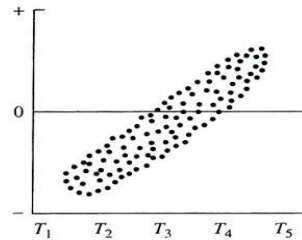
(b) No linealidad



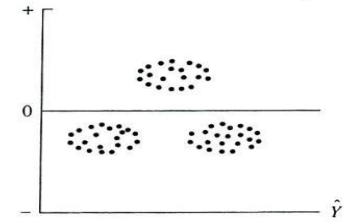
(c) Heterocedasticidad



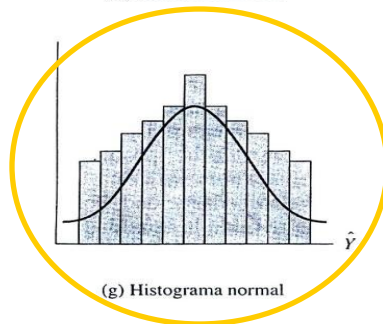
(d) Heterocedasticidad



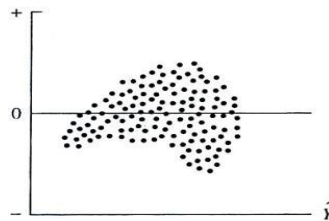
(e) Dependencia temporal



(f) Dependencia de evento



(g) Histograma normal



(h) No linealidad y heterocedasticidad

Análisis gráfico de los residuos (Hair et al, 1999)

MARCO METODOLÓGICO

6. Estudio de sensibilidad



7. Selección del modelo



8. Desarrollo del programa

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentraciones de calcio y pH experimentales de agua de producción:

Prueba	Calcio (ppm)	pH
1	1798,00	6,33
2	1229,00	7,30
3	2224,00	5,90
4	1337,00	7,22
5	1690,00	6,06
6	1457,00	7,07
7	1447,00	6,21
8	1448,00	7,17
9	1680,00	6,18
10	1418,00	7,23

Concentración de calcio ↑ pH ↓



Perfecto equilibrio

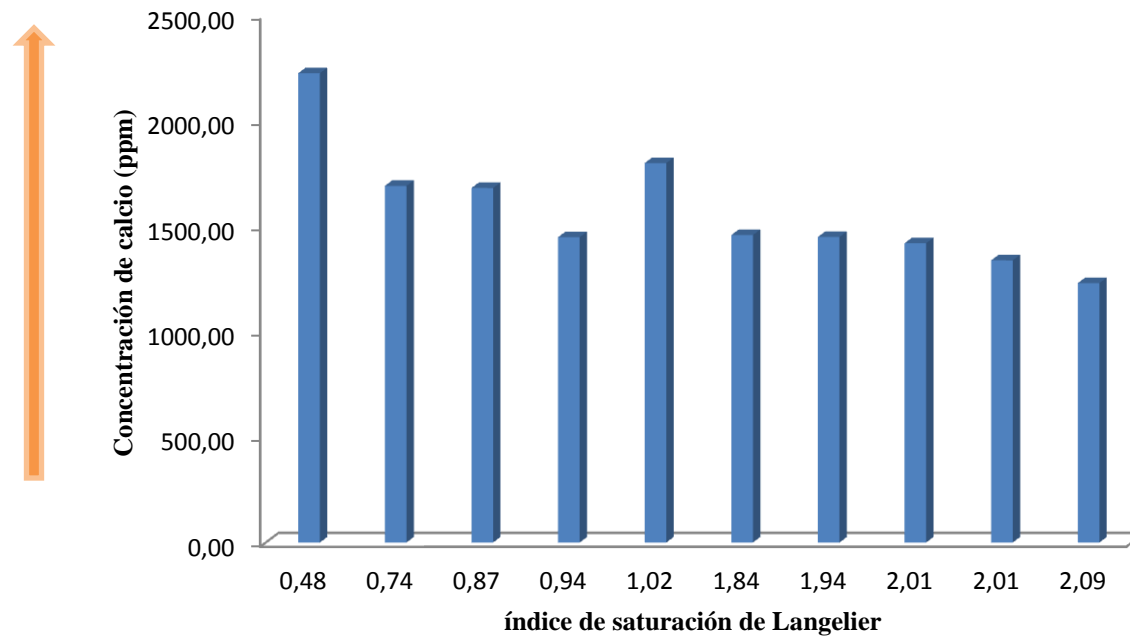
Todas las aguas de producción experimentales son incrustantes

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

COMPORTAMIENTO DE CADA MODELO PREDICTIVO:

Índice de saturación de Langelier

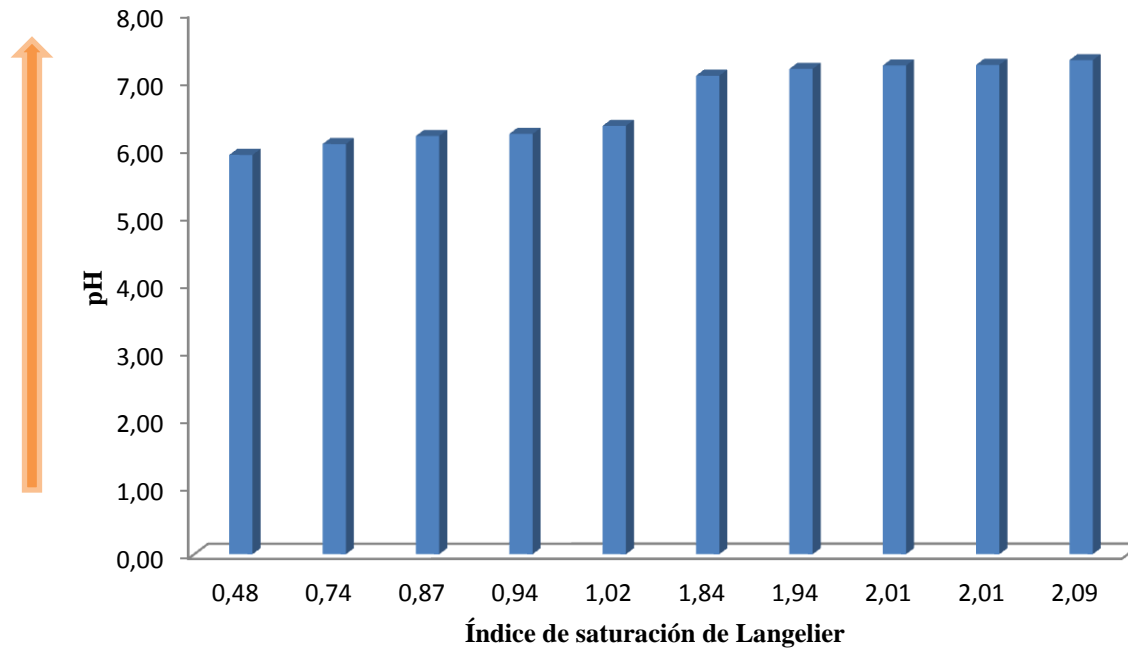
- Concentración de calcio



Concentración de calcio en función del Índice de saturación de Langelier

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

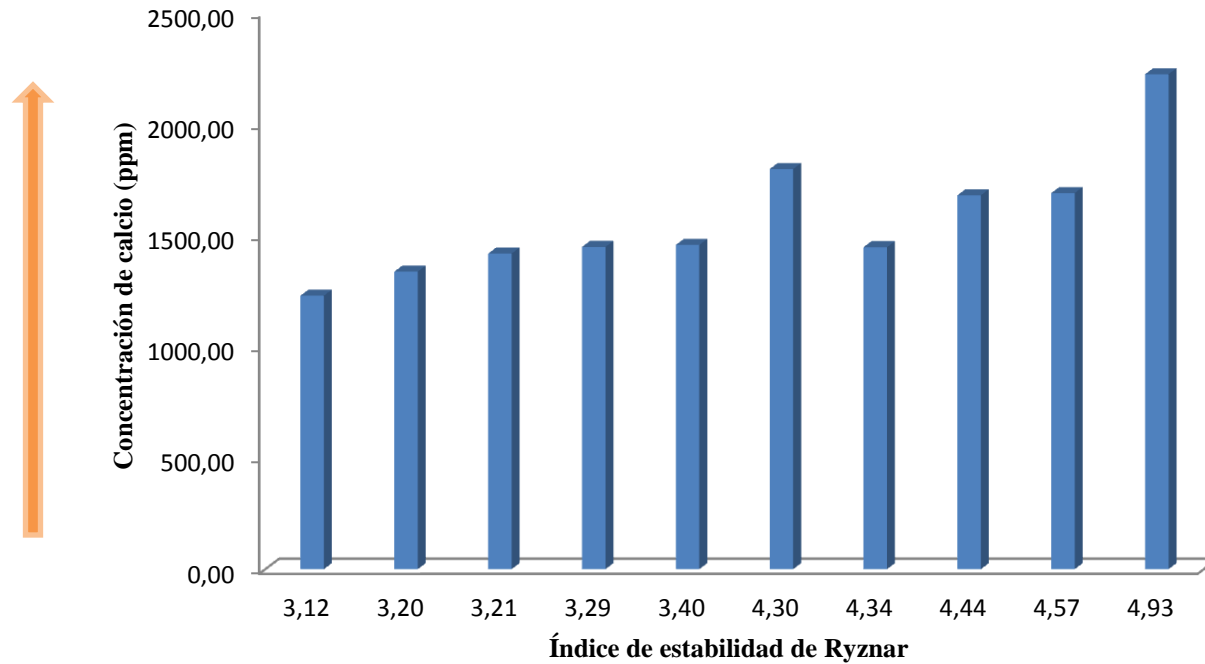
- pH



pH en función del Índice de saturación de Langelier.

Índice de estabilidad de Ryznar

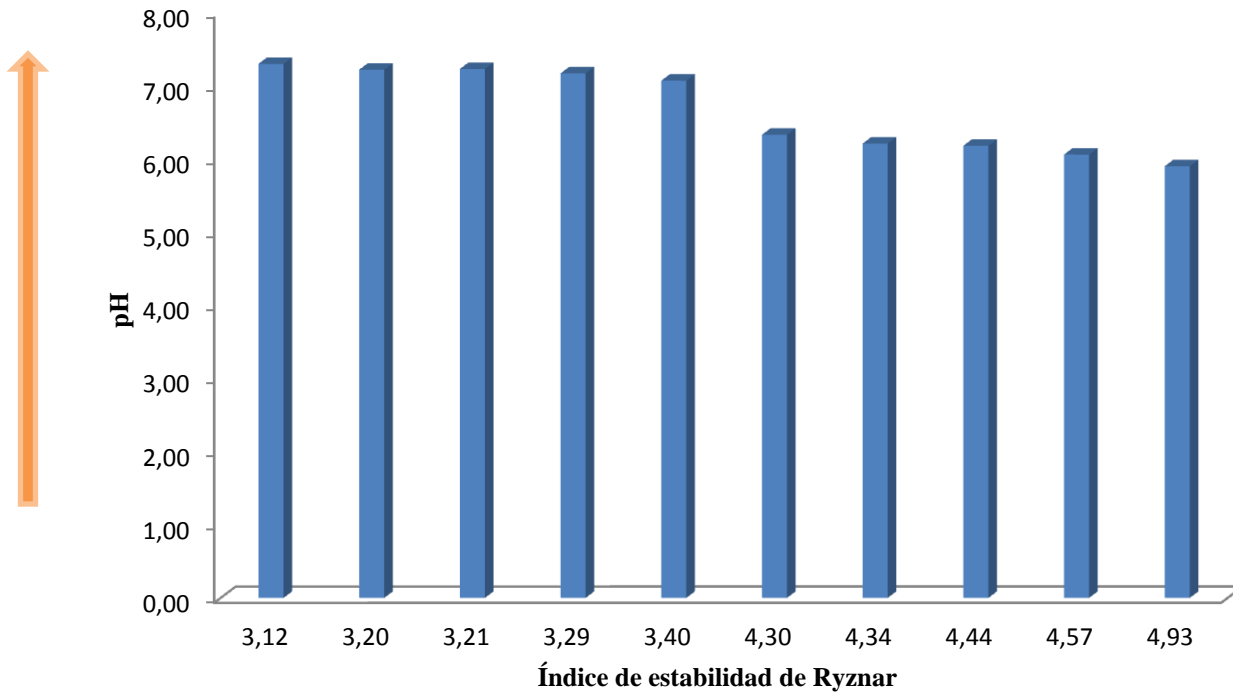
- Concentración de calcio



Concentración de calcio en función del Índice de estabilidad de Ryznar

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

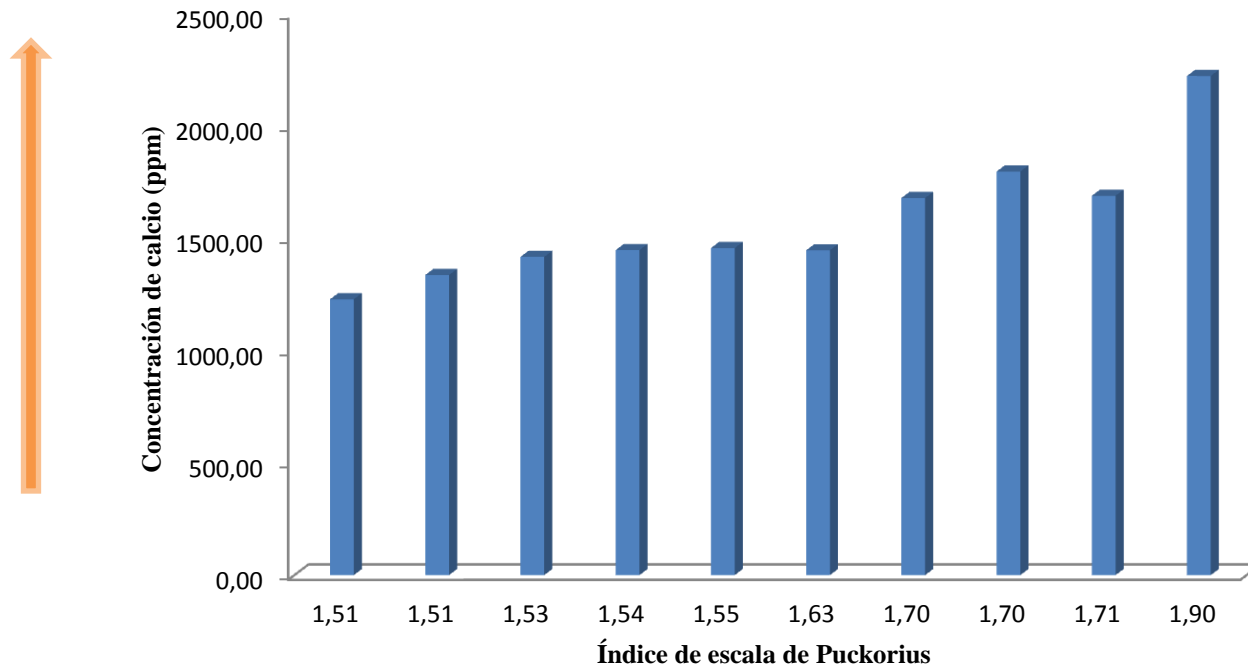
- pH



pH en función del Índice de estabilidad de Ryznar.

Índice de escala de Puckorius

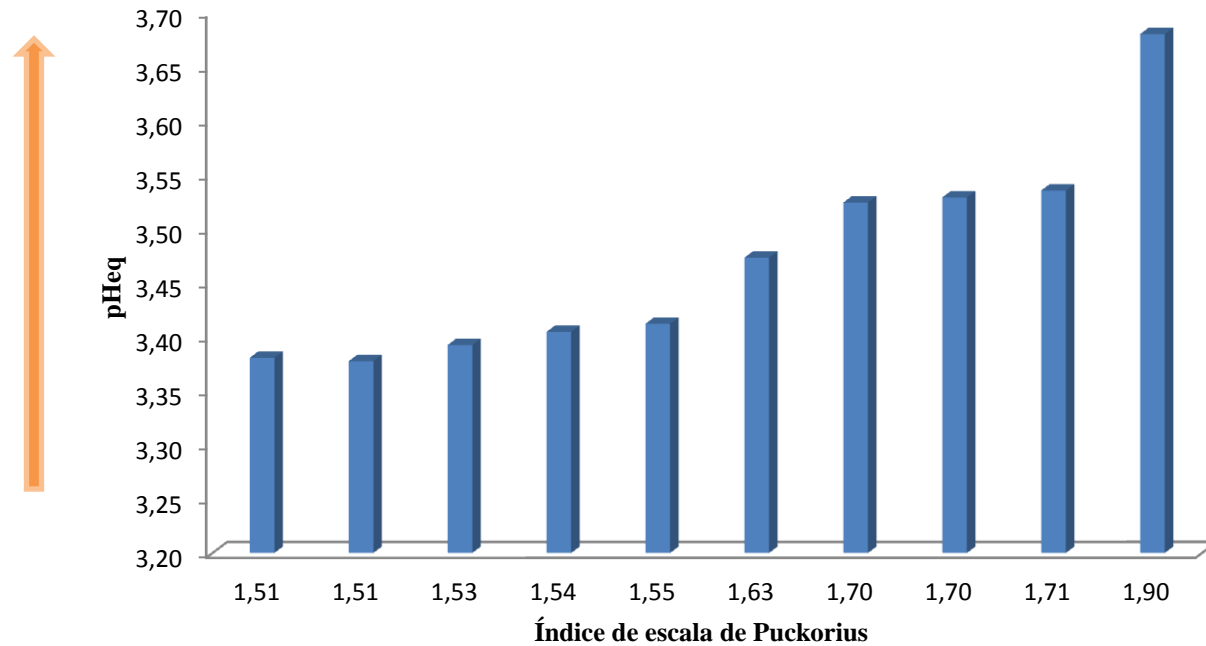
- Concentración de calcio



Concentración de calcio en función del Índice de escala de Puckorius

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

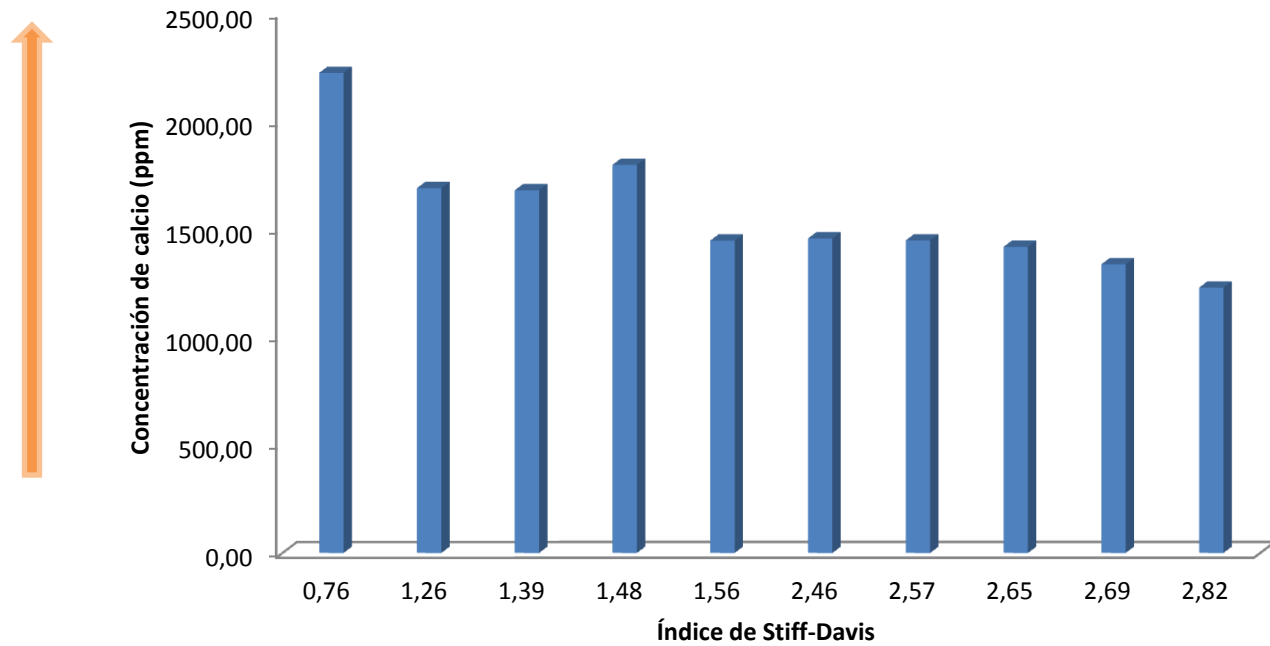
- pHeq



pHeq en función del Índice de escala de Puckorius.

Índice de Stiff-Davis

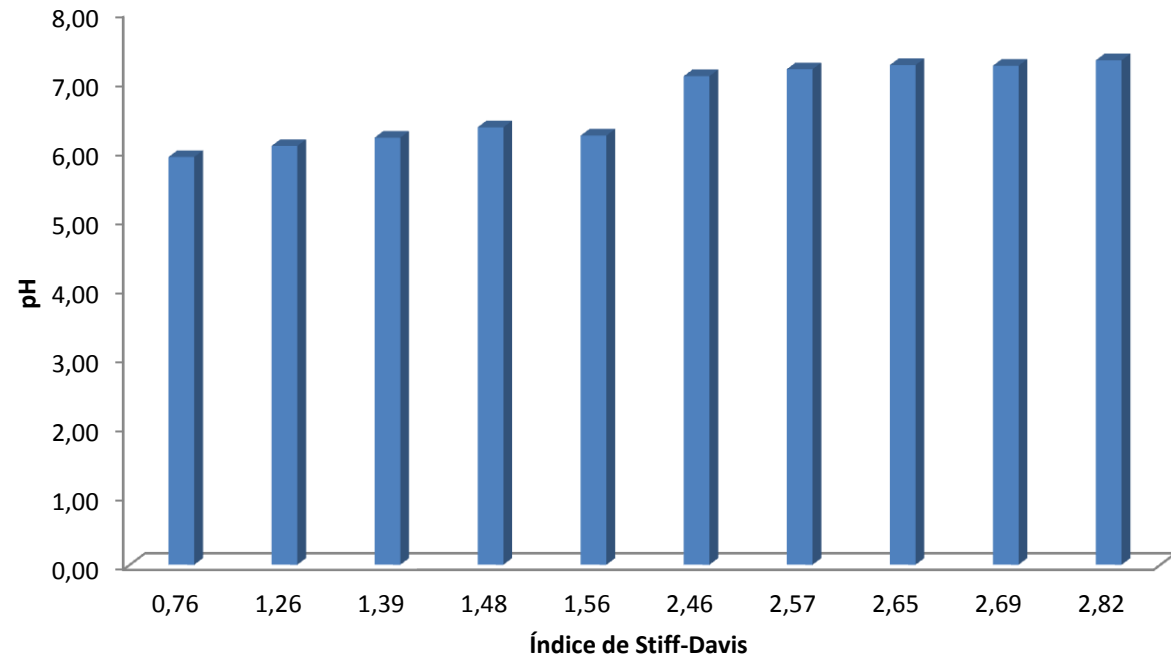
- Concentración de calcio



Concentración de calcio en función del Índice de Stiff-Davis

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

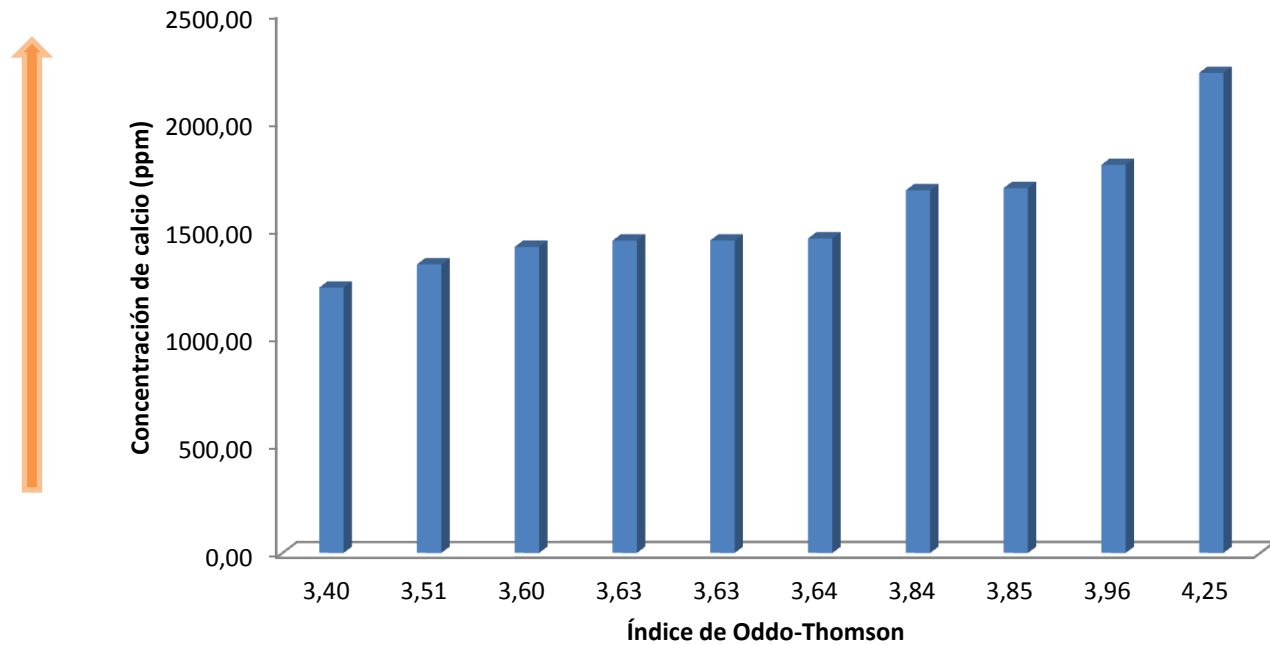
- pH



pH en función del Índice de Stiff-Davis.

Índice de Oddo-Thomson

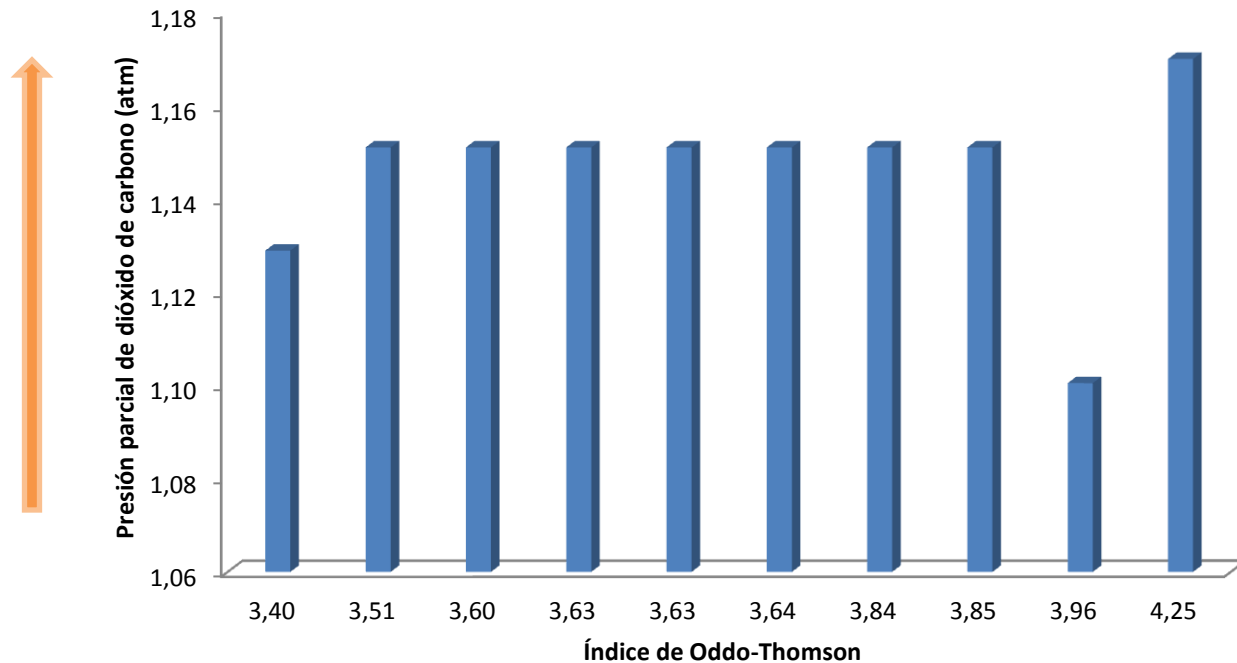
- Concentración de calcio



Concentración de calcio en función del Índice de Oddo-Thomson

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Presión Parcial de Dióxido de carbono PCO₂



Presión parcial de dióxido de carbono en función del Índice de Oddo-Thomson

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

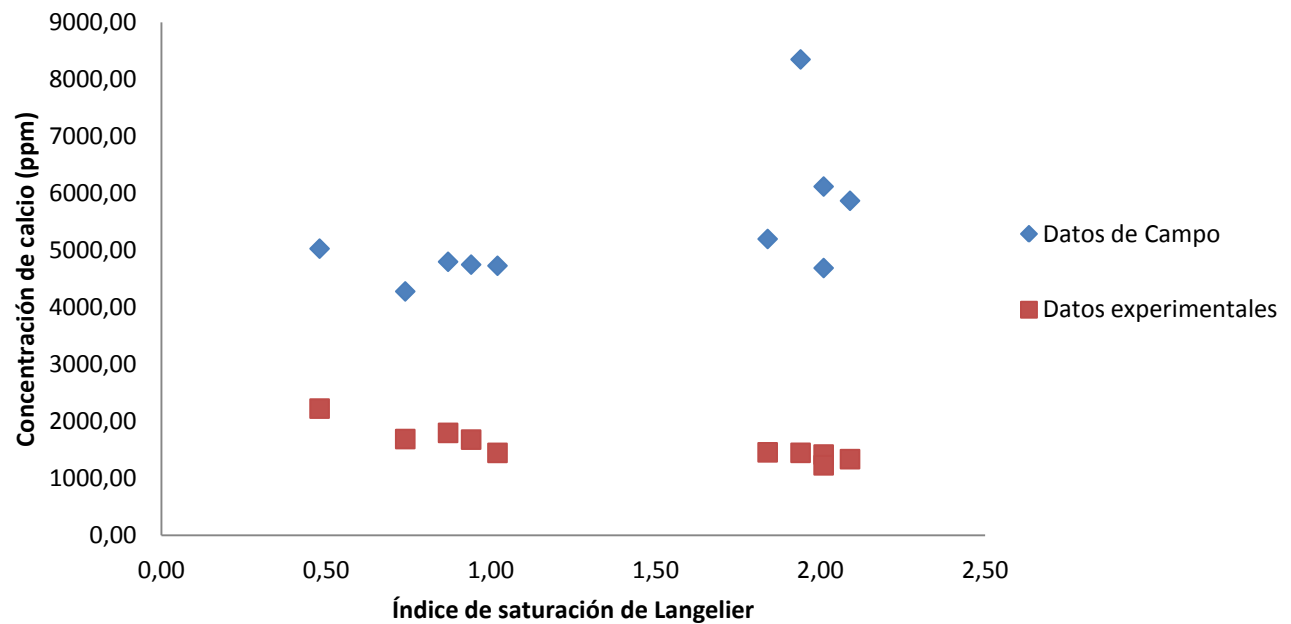
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS PREDICTIVOS

Modelo Predictivo	Concentración de calcio (ppm) (con pH constante)	pH (con concentración de calcio constante)
Índice de saturación de Langelier	>5000	5,20-5,40
Índice de estabilidad de Ryznar	5000-6540	4,50-5,50
Índice de escala de Puckorius	>30000	-
Índice de Stiff-Davis	>4500	4,30-5,1
Índice de Oddo-Thomson	100 o menos	-

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS PREDICTIVOS APLICADOS A PRUEBAS DE CAMPO Y EXPERIMENTALES

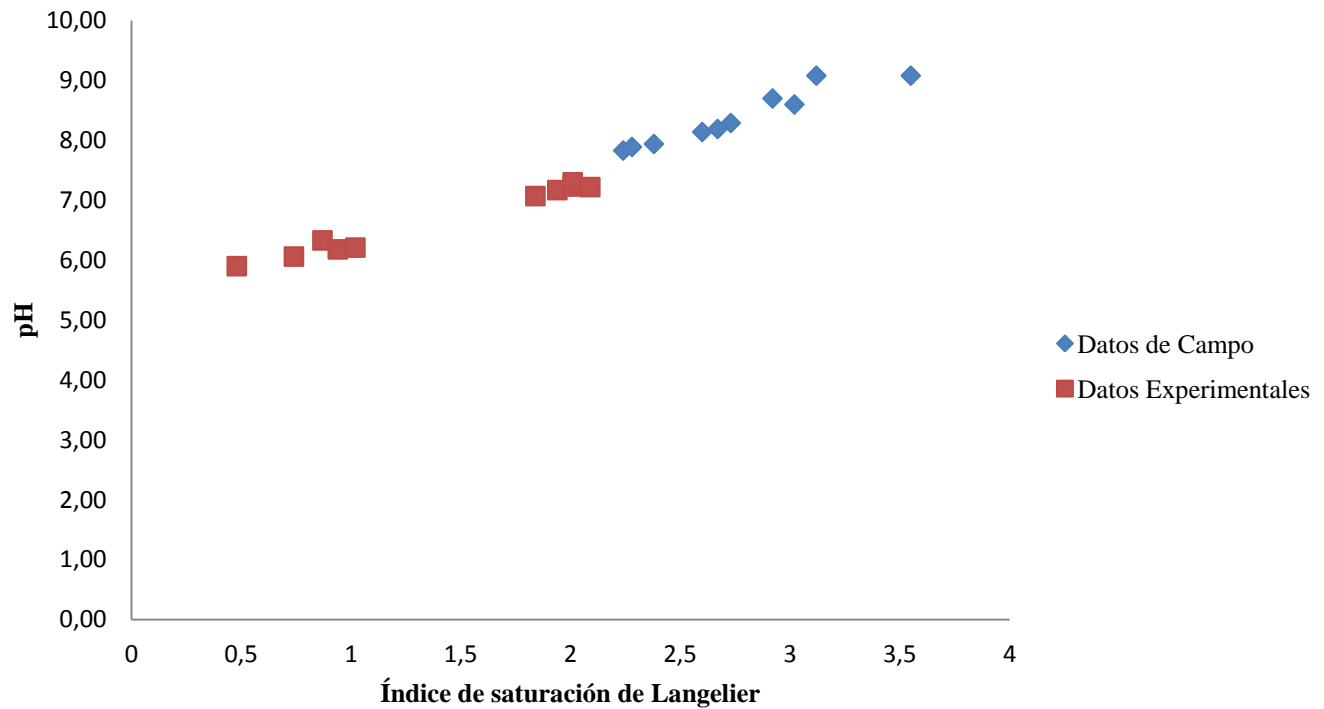
• Concentración de calcio



Comparación de la influencia de la concentración de calcio en el Índice de saturación de Langelier, tanto en pruebas de campo como experimentales

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

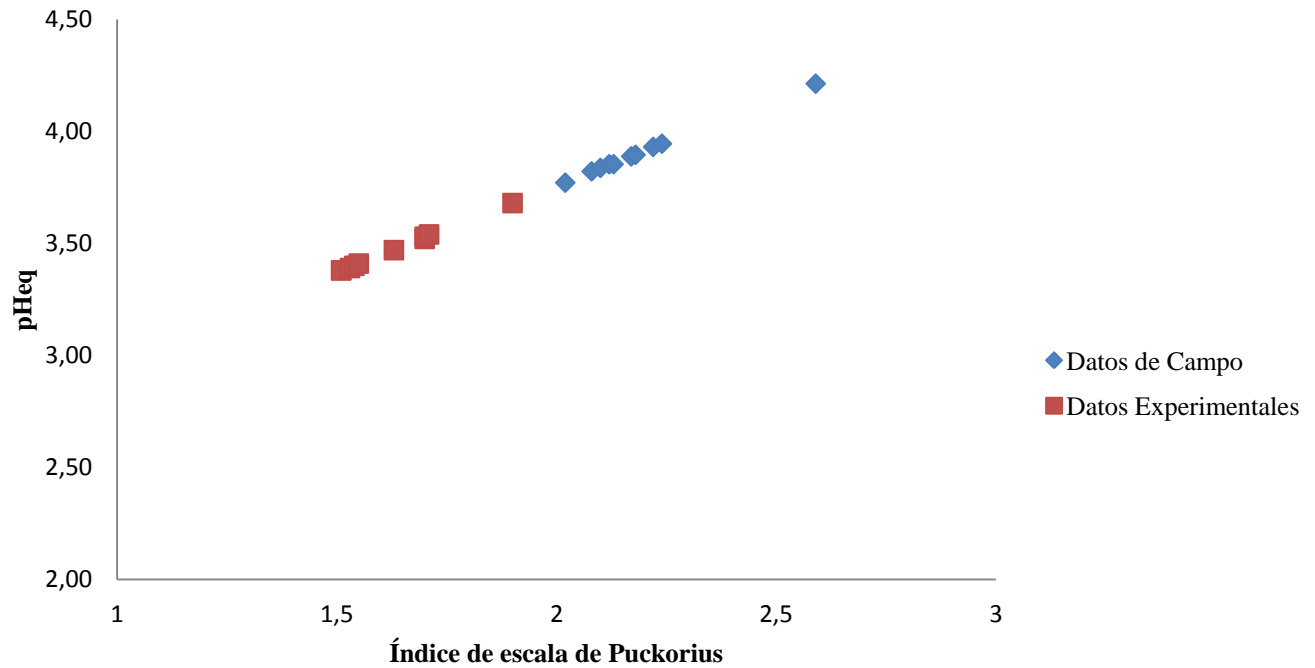
• pH



Comparación de la influencia del pH en el Índice de saturación de Langelier, tanto en pruebas de campo como experimentales

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

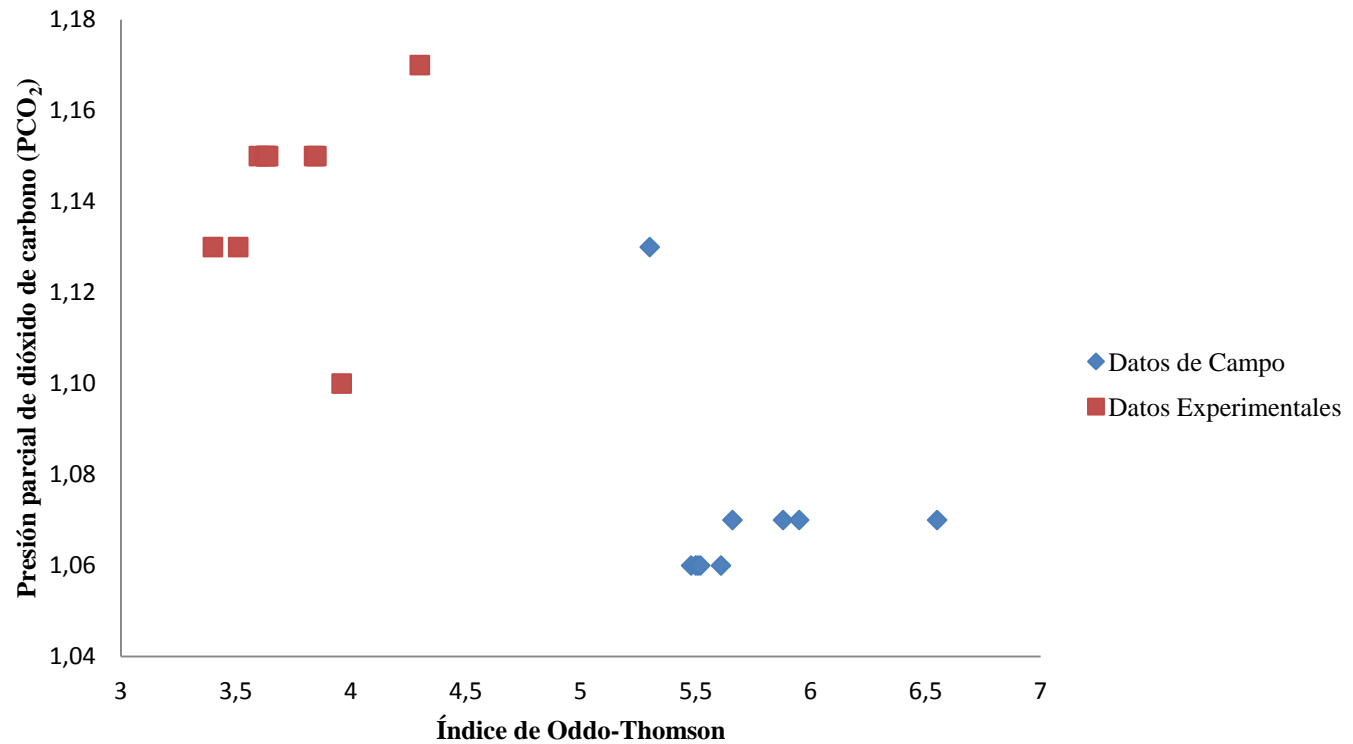
• pHeq



Comparación de la influencia del pHeq en el Índice de escala de Puckorius, tanto en pruebas de campo como experimentales

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Presión Parcial de Dióxido de carbono PCO₂



Comparación de la influencia de la presión de dióxido de carbono en el Índice de Oddo-Thomson, tanto en pruebas de campo como experimentales

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS MODELOS PREDICTIVOS

Estudio	LSI	RSI	PSI	SI	IS
Estadístico					
Media (\bar{M})	1,39	3,88	1,63	1,96	3,73
Moda (Md)	No tiene	No tiene	1.7	No tiene	3.63
Varianza (σ^2)	0,40	0,48	0,02	0,56	0,06
Desviación Estándar (σ)	0,63	0,70	0,13	0,75	0,25
Distribución Normal	Límite inferior	Límite inferior	Límite inferior	Límite inferior	Límite inferior
	-0,51	1,79	1,25	-0,28	2,99
	Límite superior	Límite superior	Límite superior	Límite superior	Límite superior
	3,30	5,97	2,00	4,20	4,77

MODELO PREDICTIVO ÓPTIMO



ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE RYZNAR



- **Desviación estándar baja**
RSI. < 5,5 Se forman fuertes incrustaciones
- 5,5 < RSI < 6,2 Se forman incrustaciones
- **Presenta mayor sensibilidad**
6,2 < RSI < 6,5 Se forman incrustaciones fáciles de disolver
- 6,8 < RSI < 8,5 Se disuelven las incrustaciones. Es corrosivo
- **Rango de operación que permite describir las características de las incrustaciones**
RSI > 8,5 Corrosión muy fuerte

ÁREA DE FORMACIÓN DE INCRUSTACIÓN EN EL TIEMPO

$$A = -0,148 + 8,5 \times 10^{-5} \cdot T \cdot C\text{CaCO}_3$$

Donde:

A= Área (sq.ft= 0.093m²)

T= Temperatura (°F)

CCaCO₃= Concentración de carbonato de calcio (ppm)



CCaCO₃= 3402,1 ppm

T= 77°F



A=0,005 m² /mes

CONCLUSIONES

- Los métodos predictivos son una herramienta eficaz para estudio de la tendencia incrustante de las aguas de producción.
- El índice de saturación de Langelier presenta una tendencia incrustante a concentraciones de calcio menores de 5000 ppm y pH mayores de 5,40, con un error de $\pm 0,63$.
- El índice de estabilidad de Ryznar presenta una tendencia incrustante a concentraciones de calcio menores de 5000 ppm, pH mayores a 5,50, con un error de $\pm 0,70$.
- El índice de escala de Puckorius presenta una tendencia incrustante a concentraciones de calcio menores de 30000 ppm, con un error de $\pm 0,13$.

- El índice de Stiff-Davis presenta una tendencia incrustante a concentraciones de calcio menores de 4500 ppm y pH mayores a 5,1, con un error de $\pm 0,75$.
- El índice de Oddo-Thomson presenta una tendencia incrustante a concentraciones de calcio mayores de 100 ppm y presiones parcial de dióxido de carbono mayores a 1.10atm, con un error de $\pm 0,25$.
- Las aguas de producción de campo, tienen un comportamiento aleatorio y presentan mayores concentraciones de calcio y de pH.
- El modelo predictivo más óptimo para predecir la formación de incrustaciones a concentraciones de calcio es el índice de estabilidad de Ryznar.

- El único caso de aguas no incrustantes, se presenta en las aguas de producción de campo con concentración de calcio de 8350 ppm y pH de 8,70 en el Índice de Stiff-Davis
- El área de incrustación por mes para un sistema que presenta concentración media de carbonato de calcio de 3042,1 ppm es de 0,005.

- Realizar una ampliación del programa predictivo de incrustaciones a otros tipos depósitos, como las de óxido férrico y para todo tipo de aguas, ya sean provenientes de calderas o de tratamiento.
- Determinar cada uno de los modelos predictivos para gran cantidad de pruebas (más de una) tanto experimentales o de campo, para así realizar comparaciones más detalladas de estas por separado y evaluar si existe algún cambio considerable.
- Evaluar cada uno de los modelos predictivos en condiciones extremas de operación y verificar si la tendencia de estos es la igual a la que se determinó anteriormente o cambia de forma considerable.

- **Establecer la influencia de sistemas de dos o más fases en los modelos predictivos desarrollados.**



**Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química**



TRABAJO ESPECIAL DE GRADO II

MODELADO DE MÉTODOS PREDICTIVOS DE FORMACIÓN DE INCRUSTACIONES EN TUBERÍAS CON FLUJO DE AGUA DE PRODUCCIÓN

Tutor:

Prof. Francisco Yáñez

Presentado por:

Br. Ortega G. Dayenni

Ciudad Universitaria, Mayo de 2010