

# Interpretación de Calidad de Agua para Casos con Potencial Intrusión Salina

## Interpretation of Water Quality for Cases with Potential Saline Intrusion

Andrés Lazo-Páez<sup>1</sup>, Yuliana Solís-Castro<sup>2</sup>

---

Lazo-Páez, A; Solís-Castro, Y. Interpretación de Calidad de Agua para Casos con Potencial Intrusión Salina. *Tecnología en Marcha*. Diciembre 2019. Vol 32 Especial. Laboratorio Nacional de Aguas. Pág 82-96.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v32i10.4883>

1 Área Funcional Investigación Aplicada. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). Costa Rica. Correo electrónico: [alazo@aya.go.cr](mailto:alazo@aya.go.cr).

2 Laboratorio Nacional de Aguas. Área de Química de Agua Potable. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Costa Rica. Correo electrónico: [ysolis@aya.go.cr](mailto:ysolis@aya.go.cr).



## Palabras clave

Intrusión salina; indicador,; agua potable.

## Resumen

Una correcta interpretación de la calidad del agua, como parte de la gestión de servicios de agua potable, constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones. Esto aplica de manera particular a casos en los cuales existe agua cuya composición de sólidos disueltos totales difiere de la condición típica para una determinada zona geográfica. Es por ello que, en el presente estudio se presenta una metodología breve que permite establecer un criterio preliminar si una calidad de agua específica se encuentra afectada por una condición de intrusión salina, o bien si lo que se encuentra es influencia de un estrato geológico propiamente. Según el ejercicio realizado, los indicadores más adecuados para la aplicación en cuestión son: tendencias históricas de conductividad y cloruros, razón de Simpson, relación calcio – magnesio, relación sodio – cloruro, intercambio de iones, y el comportamiento de los sólidos disueltos totales. Estos índices de calidad permiten identificar claramente los casos de intrusión salina, frente a otros tales como: alta dureza total, alta concentración de sólidos disueltos, metales disueltos, o incluso aguas muy ácidas o básicas. Aunque pueden existir más tipos de herramientas, se considera que el grupo de índices identificados constituyen un punto de partida técnico y bien fundamentado para la gestión de los servicios cuyas fuentes se podrían ver afectadas por diferentes tipos de cambios en la calidad del agua.

## Keywords

Saline intrusion; index; drinking water.

## Abstract

The right water quality data interpretation must be considered, as a main part of the drinking water supply management, and it is also plays a key role in decision making. This situation usually applies when the dissolved solids profile in a specific water sample is completely different from typical behaviors in a specific geographical area. Therefore, the current study introduces a brief methodology that allows the establishment of preliminary water quality criteria, when water is affected by salt water intrusion, or even if it suffers the influence of a geological condition. According to calculations presented in this document, the most adequate indexes for the water quality evaluation are: historical conductivity and chloride trends, Simpson ration, calcium-magnesium ratio, sodium-chloride ratio, ion exchange ratios, and the behavior of the total dissolved solids. These calculations allow the differentiation between a saltwater intrusion condition and other rare situations, such as: hard water, high total dissolved solids concentration, dissolved metals, or even very basic or acidic waters. Even though some other tools might exist, the ones presented in this document can be used as a starting point, with a very robust and science – based background, in order to support the management of drinking water services whose quality faces changes without a clear explanation.

## Introducción

La valoración de la calidad del agua, mediante análisis fisicoquímicos y microbiológicos, es fundamental en los proyectos de abastecimiento de agua para consumo humano. En adición a la disponibilidad del recurso hídrico, se debe considerar si se cumple lo establecido en el

Reglamento para la Calidad del Agua Potable, Decreto Ejecutivo 38924-S. En este sentido, una de las preocupaciones es la posibilidad de encontrar acuíferos con potencial de intrusión salina, generalmente en función con la cercanía al mar o a un estero. Esta condición no sólo representa un problema de contaminación, sino que también es un indicador claro de deterioro del acuífero como tal, lo cual probablemente podría afectar sistemas cercanos.

Por otra parte, en el gremio de los administradores de servicios de agua potable, es posible encontrar algunos mitos relacionados con el potencial de intrusión salina. La sola presencia de algunos iones en el agua en ciertas concentraciones (cloruro, sodio, magnesio, sulfato...), o bien cierta magnitud de conductividad, se interpreta como afectación de la fuente de agua dulce por el fenómeno antes indicado. En el presente documento se presentan las consideraciones que recomiendan diversos científicos en el mundo para generar un criterio técnico firme al respecto.

Para la presentación de los resultados se emplea la metodología de casos de estudio. Se utilizan caracterizaciones de pozos reales para validar un grupo de indicadores propuestos para evidenciar el potencial de intrusión salina. Finalmente, se emiten los criterios técnicos a considerar para el correcto uso de la herramienta.

## Marco conceptual

Existe una gran variedad de indicadores que han sido propuestos para valorar casos de posible intrusión salina, los cuales se muestran a continuación.

### Tendencia histórica del valor de conductividad y concentración de cloruros

Tal y como indica Abdalla [1], el agua de mar tiene generalmente una composición química muy uniforme, dado el gran tiempo de retención de los constituyentes iónicos más importantes. Por otra parte, el agua dulce de fuentes subterráneas se caracteriza por composiciones altamente variables. Aunque una gran parte de los indicadores estudiados para el tema de intrusión salina contemplan una razón respecto al cloruro, es claro que un incremento de la concentración de los iones cloruro en agua subterránea es un criterio preliminar de potencial intrusión salina.

Dado el incremento tan marcado en cloruros, los cuales son parte de los sólidos disueltos totales presentes en el agua, es de esperar un incremento de la conductividad junto con la variación en la concentración de iones disueltos. Ahora bien, desde el punto de vista de magnitudes, es posible encontrar que autores como Scheidleder [2] sugieren vigilancia de la tendencia histórica de los cloruros entre 100 mg/L y 250 mg/L, aunque en Costa Rica el Reglamento para la Calidad del Agua Potable vigente sugiere esta vigilancia desde 25 mg/L y en términos de conductividad desde 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### Razón de Simpson

Según Abdalla [1], el ion cloruro es dominante en agua de mar, mientras que solamente se encuentra en pequeñas cantidades en agua subterránea. Mientras tanto, el ion bicarbonato usualmente está en grandes cantidades en el agua subterránea, mientras que es difícil encontrar valores significativos en el agua de mar. De acuerdo con los resultados obtenidos con la relación de la ecuación 1 y según las estimaciones realizadas por Todd [3], es posible generar un indicador de calidad de agua según la clasificación que se muestra en el cuadro 1. Estas seis clases se deben valorar en conjunto con otros criterios que permitan emitir un criterio integral de calidad de agua y la influencia de otras posibles fuentes de afectación a la calidad del agua.

$$\text{Razón de Simpson} = \frac{\text{Cl}}{\text{CO}_3 + \text{HCO}_3} \quad (1)$$

**Cuadro 1.** Contaminación presuntiva por intrusión salina según la razón de Simpson [1].

Clasificación del agua	Valor
Buena calidad	$\leq 0.5$
Ligeramente contaminada	0.5 - 1.3
Moderadamente contaminada	1.3 - 2.8
Muy contaminada	2.8 - 6.6
Altamente contaminada	6.6 - 15.5
Severamente contaminada	$> 15.5$

### Relación Ca/Mg

Según indica Hounslow [4], de acuerdo a la composición típica del agua de mar, es de esperar una relación molar Ca/Mg cercana a 0.18, el cual es un valor bastante distante de lo que se puede encontrar en agua subterránea, en la cual el magnesio típicamente se encuentra en cantidades mucho menores al calcio [5]. Por lo tanto, respecto a este parámetro es posible indicar que valores  $\text{Ca/Mg} \leq 1$  indican un potencial de intrusión salina [6] [7]. Tal comportamiento se relaciona con una disminución progresiva del valor por presencia de iones magnesio. Probablemente, una relación menor a 1 se presentará en etapas más avanzadas de la intrusión salina, dado que en los inicios existe un enriquecimiento repentino del calcio. Es por ello que se propone una valoración progresiva de estos indicadores.

### Relación Na/Cl

La valoración de la relación molar entre el sodio y el cloruro parte de la composición común del agua de mar. Según Klassen et al [6], un valor y típico de esta relación en agua de mar es 0.86, mientras que agua con contaminación antropogénica muestra valores superiores a 1 [5]. El fenómeno de intrusión salina generalmente inicia con valores de Na/Cl bajos.

### Intercambio de iones

En ocasiones se puede confundir un potencial fenómeno de intrusión salina con otros procesos que ocurren en el agua subterránea. Uno de esos casos tiene que ver con las posibles interacciones entre el agua y rocas subterráneas, o bien por interacción con materiales acumulados en el terreno. Es común que se presenten procesos naturales de intercambio iónico, especialmente con arcillas (intercambio de cationes), o bien fenómenos de disolución y precipitación de carbonatos [5]. En acuíferos costeros, el proceso de intercambio es indicador de fenómenos de “lavado” de material geológico durante época lluviosa y se caracteriza por una relación  $(\text{HCO}_3 + \text{SO}_4)/(\text{Ca} + \text{Mg})$  mayor a uno. El proceso de intercambio catiónico inverso se refiere a la influencia de agua salina, donde hay intercambio de iones sodio o potasio en agua subterránea por calcio y magnesio en el acuífero [1].

En adición a lo anterior, también se han realizado algunos intentos para verificar este comportamiento del agua en el subsuelo, por medio de un indicador conocido como BEX (intercambio de bases). Este parámetro permite determinar si el acuífero se está salinizando o si sufre el efecto contrario, o bien, si ya ha experimentado estos fenómenos. De acuerdo con Stuyfzand [8], se supone que el agua de mar (con altas concentraciones de Cl, Na, K y Mg) desplaza el agua fresca que contenía altas concentraciones de Ca y  $\text{HCO}_3$ , o viceversa. Se

supone que al menos el sodio se adsorbe durante la salinización, o bien, el calcio se adsorbe durante la recuperación del acuífero. Las expresiones para aproximar el fenómeno que ocurre en cada acuífero son:

$$BEX = Na + K + Mg - 1.0716 \cdot Cl \text{ (meq/L)} \quad (2)$$

$$BEX_D = Na + K - 0.8768 \cdot Cl \text{ (meq/L)} \quad (3)$$

En el cual la ecuación 2 aplica para sistemas sin dolomita y la ecuación 3 para sistemas con dolomita. Los coeficientes que acompañan al ion cloruro en la ecuación corresponden a las relaciones equivalentes de los cationes versus el ion cloruro, considerando la composición típica del agua de mar. Ahora bien, la interpretación de los resultados se realiza según se indica en el cuadro 2.

**Cuadro 2.** Interpretación del parámetro BEX [8].

Balance BEX	Sólo intercambio
Negativo	Salinizado
Cero	No hay intercambio
Positivo	Recuperado

Stuyfzand [8] también aporta herramientas para interpretar adecuadamente el índice BEX, según criterios de calidad de agua, entre las cuales se destacan:

- BEX como falso positivo: disolución de minerales como dolomita ( $Mg^{2+}$ ) o albita ( $Na^+$ ), mineralización de biomasa fresca ( $K^+$ ) o lixiviación de fertilizantes o residuos orgánicos ( $K^+$ ).
- BEX como falso negativo: disolución de halita (poco  $K^+$  y  $Mg^{2+}$ ), transformación de minerales como dolomitización ( $Mg^{2+}$ ), formación de nuevos minerales ( $K^+$ ,  $Na^+$  y  $Mg^{2+}$ ), síntesis de biomasa ( $K^+$ ) o depósito de cloro en forma gaseosa ( $Cl^-$ ).
- Si el cloruro decrece o se mantiene constante, y la tendencia del BEX es: de positivo a cero, hay recuperación; de cero a positivo, hay salinización o falso positivo de BEX; más negativo, hay falso negativo de BEX.
- Si el cloruro crece y la tendencia BEX es positiva, salinización por alguna fuente no identificada (diferente al agua marina).

### Sólidos disueltos totales

Crittenden [9] indica que los sólidos disueltos totales (SDT) son una referencia indirecta de posibles procesos de intrusión salina. El autor recomienda verificar la tendencia histórica de este parámetro, vigilando valores entre 500 mg/L y 1000 mg/L, pues al llegar a 1000 mg/L ya se considera como agua salobre. Este es un parámetro de fácil medición el cual se puede determinar de manera experimental o mediante la ecuación 4:

$$SDT = 0.6 \cdot Alcalinidad + Na + K + Ca + Mg + Cl + SO_4 + SiO_3 + NO_3 + F \quad (4)$$

Para la determinación de este indicador se utilizó la ecuación 4, suponiendo una concentración de sílice de 70 mg/L, para todos los casos.

## Otros indicadores

En la literatura es posible encontrar otros indicadores los cuales fueron valorados en este estudio, pero que, al emplear datos reales de calidad de agua no permitieron una identificación clara de la condición de la misma. Una herramienta muy recomendada para análisis más detallado de datos son los diagramas hidroquímicos, como: Collins, Piper, Stiff, entre otros [10].

## Metodología

En primera instancia, con el fin de identificar pozos que permitan ilustrar casos con composición de agua con intrusión salina o similar, se tomó como punto de partida la información de calidad de agua fisicoquímica que posee el Laboratorio Nacional de Aguas (LNA), en la cual los parámetros se encuentran acreditados ante la norma INTE-ISO-IEC 17025:2005 siguiendo los criterios del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [11]. Una vez consolidada la información, se le aplica los indicadores publicados en fuentes internacionales y que fueron mencionados en el marco de referencia. En una segunda etapa, se valoraron los resultados obtenidos en cada caso de estudio, y se explicaron los fenómenos a los cuales responden los resultados. Asimismo, se trató de establecer las causas por las cuales cada indicador mostró los resultados obtenidos. Finalmente, se empleó los datos generados para recomendar una herramienta consolidada para valorar de manera científica y objetiva casos de posible intrusión salina.

## Análisis de resultados

Para los casos de estudio se utilizó la calidad fisicoquímica puntual del agua de siete pozos del país, la cual se muestra en el cuadro 3. Los datos analíticos se obtuvieron del programa de control y vigilancia de calidad del agua que efectúa el LNA. Además, se utilizó los datos históricos de conductividad y cloruros los cuales se muestran más adelante en los gráficos de tendencia histórica.

**Cuadro 3.** Calidad fisicoquímica puntual de los siete pozos en estudio.

Parámetro	Pozo CN 484 Papa-gayó	Pozo Villa Nueva Coyolar- Caldera	Pozo Socorrito 1 Punta- renas	Pozo 3 Bolsón Ortega	Pozo AB 2330 La Uruca	Pozo 7 Santa Teresa Cóbano	Pozo Jobo 2 Tama- rindo
	AYA- ID-09870- 2015	AYA- ID-08135- 2018	AYA- ID-02272- 2017	AYA- ID-06814- 2018	AYA- ID-04551- 2014	AYA- ID-01995- 2015	AYA- ID-08351- 2016
Alcalinidad (mg/L)	150	177	167	256	310	360	242
Aluminio (µg/L)	N.D.	8,7	22,3	D.	N.D.	19,9	7
Amonio (mg/L)	-	-	D.	D.	-	-	N.D.
Antimonio (µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

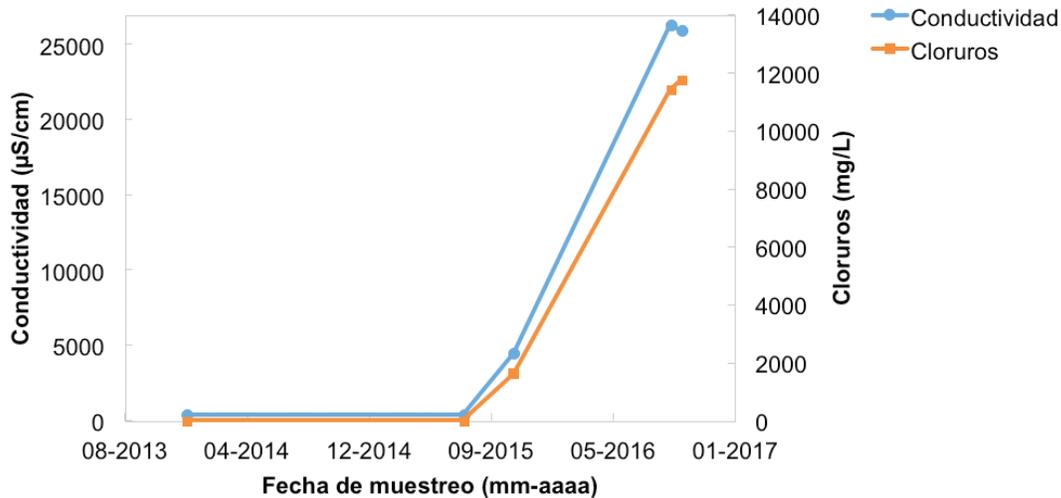
Continúa...

Continuación

Parámetro	Pozo CN 484 Papa-gayo	Pozo Villa Nueva Coyolar- Caldera	Pozo Socorrito 1 Punta- renas	Pozo 3 Bolsón Ortega	Pozo AB 2330 La Uruca	Pozo 7 Santa Teresa Cóbano	Pozo Jobo 2 Tama- rindo
	AYA- ID-09870- 2015	AYA- ID-08135- 2018	AYA- ID-02272- 2017	AYA- ID-06814- 2018	AYA- ID-04551- 2014	AYA- ID-01995- 2015	AYA- ID-08351- 2016
Cadmio (µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Calcio (mg/L)	588,4	54,1	59,2	103	69,7	17,6	74,2
Cloruros (mg/L)	1616,7	311,67	23,65	198,14	409	24,81	52,71
Cobre (µg/L)	N.D.	D.	D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Color (UPt-Co)	D.	D.	D.	4	5	N.D.	N.D.
Conductividad (µS/cm)	4510	1450	481	1065	1635	974	694
Cromo (µg/L)	3,2	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Dureza Calcio (mg/L)	1471	135	148	258	174	44	185
Dureza Total (mg/L)	2337	145	205	441	386	68	343
Fluoruros (mg/L)	N.D.	0,3	N.D.	N.D.	0,37	0,12	N.D.
Fosfatos (mg/L)	N.D.	-	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Hierro (µg/L)	8561,3	21,8	543,1	10,6	1835	35,7	6,1
Magnesio (mg/L)	210,5	2,5	13,9	44,5	51,5	5,7	38,2
Manganeso (µg/L)	19,4	265,7	D.	N.D.	162	9,4	N.D.
Mercurio (µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	D.	N.D.	N.D.	N.D.
Níquel (µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Nitratos (mg/L)	1,49	7,58	15,1	10,74	N.D.	N.D.	9,85
Nitritos (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
pH	6,83	6,98	7,05	7,01	6,28	8,14	7,3
Plomo (µg/L)	N.D.	D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	D.
Potasio (mg/L)	1,4	D.	3,3	N.D.	32,6	16,3	N.D.
Selenio (µg/L)	D.	N.D.	0,7	N.D.	N.D.	N.D.	D.
Sílice (mg/L)	Para el cálculo de los SDT se supone una concentración de 70 mg/L						
Sodio (mg/L)	21,5	231,5	13,3	40,9	258,2	204,7	13,7
Sulfatos (mg/L)	229,72	27,39	22,16	40,03	39,01	134,96	29,16
Turbiedad (UNT)	0,97	0,61	2,77	0,36	1,5	0,2	D.
Zinc (µg/L)	197,9	14,2	4,8	227,3	29	N.D.	43,9

### Caso 1. Pozo CN 484 de Papagayo Sur

En la figura 1 se muestra los datos históricos (del 2013 al 2016) de conductividad y concentración de cloruros, en el gráfico se evidencia como en el año 2015, el agua tuvo un incremento repentino en la concentración de cloruros y la conductividad. Para dos posteriores muestreos en el 2016, se puede observar como los valores aumentan exponencialmente, indicando intrusión salina. Por otro lado, en el cuadro 4, se muestran los resultados de los demás indicadores.



**Figura 1.** Tendencia histórica de conductividad y cloruros para el Pozo CN 484 de Papagayo Sur.

**Cuadro 4.** Resultados de los indicadores para el Pozo CN 484 de Papagayo Sur.

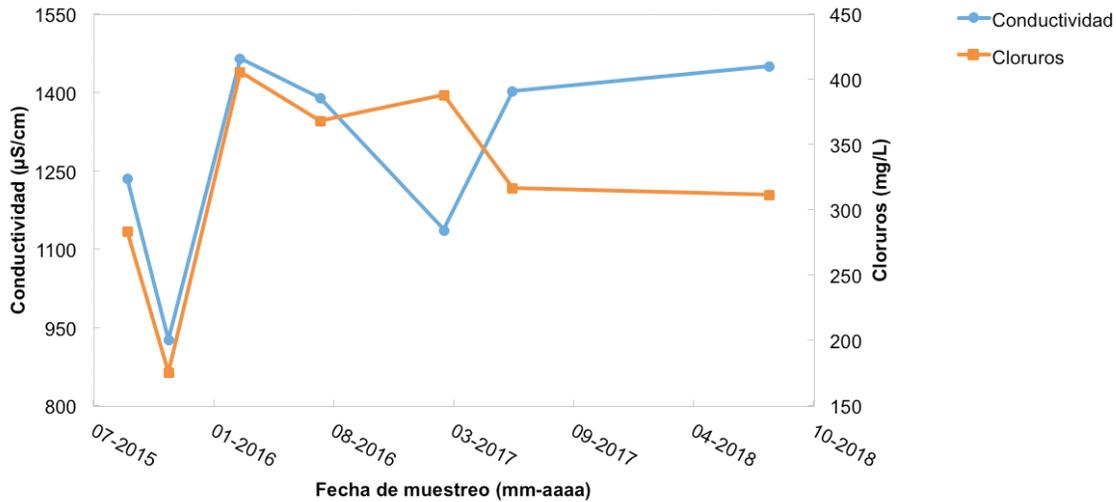
Indicador	$\frac{Cl}{CO_3+HCO_3}$	$\frac{Ca}{Mg}$	$\frac{Na}{Cl}$	BEX (meq/L)	SDT (mg/L)
Valor	18.5	1.68	0.02	-43.4	2857
Observación	Agua severamente contaminada	El acuífero no se encontraba en una etapa tan avanzada de intrusión salina	Impacto de intrusión salina	Impacto de intrusión salina	Agua salobre

Como se puede observar, en este caso todos los indicadores coinciden en que existe impacto por intrusión salina y la razón de Simpson indica que el agua está severamente contaminada; sin embargo, la concentración de magnesio no fue lo suficientemente elevada en relación con el calcio como para que el indicador de la relación la catalogara con intrusión salina avanzada.

### Caso 2. Pozo Villa Nueva de Línea Coyolar – Caldera

En la figura 2 se muestra la tendencia histórica de concentración de cloruros y conductividad, del 2015 al 2018. Este pozo posee una conductividad alrededor de 1300 µS/cm y cloruros en torno a 300 mg/L, lo cual se podría confundir con alguna tendencia a intrusión salina. Sin

embargo, como se puede observar en el gráfico, en los 7 muestreos efectuados durante 4 años no se ha observado tendencia considerable a incremento en ninguno de los dos parámetros. En el cuadro 5 se muestran los resultados de los demás indicadores, los cuales coinciden en que el agua está contaminada, pero que la misma no se debe a intrusión salina. Es agua muy mineralizada, principalmente con cloruro de sodio.



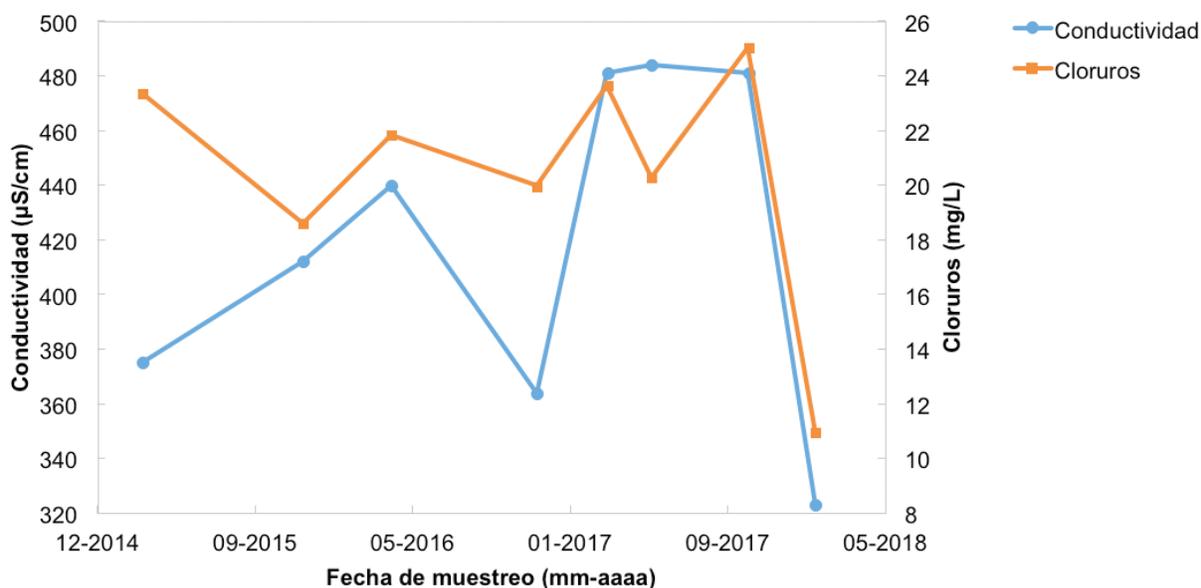
**Figura 2.** Tendencia histórica de conductividad y cloruros para el Pozo Villa Nueva de Línea Coyolar – Caldera

**Cuadro 5.** Resultados de los indicadores para el Pozo Villanueva de Línea Coyolar – Caldera.

Indicador	$\frac{Cl}{CO_3+HCO_3}$	$\frac{Ca}{Mg}$	$\frac{Na}{Cl}$	BEX (meq/L)	SDT (mg/L)
Valor	3.0	12.98	1.15	0.7	830
Observación	Agua con contaminación evidente	Indica que la contaminación no es por intrusión salina	Indica que la contaminación no es por intrusión salina	No intrusión salina	Agua no salobre, pero en alerta

### Caso 3. Pozo Socorrito 1 en Puntarenas

En la figura 3 se muestra la tendencia histórica de conductividad y cloruros para el Pozo Socorrito 1 en Puntarenas, los datos son de ocho muestreos efectuados entre el 2015 y el 2018. El pozo se caracteriza por poseer agua dura, generalmente con una dureza total mayor a 200 mg/L (ver cuadro 3). Además, en algunos muestreos la conductividad ha alcanzado casi los 500 µS/cm, lo que podría generar dudas acerca si esos resultados representan intrusión salina o no. Observando el gráfico es notorio como no existe tendencia a incremento en los cuatro años y por lo tanto no existe impacto por intrusión salina. En el cuadro 6 se detallan los resultados de los demás indicadores. Como se pudo observar, para este caso todos los indicadores coincidieron en que el agua es de buena calidad y no se encuentra salinizada ni contaminada.



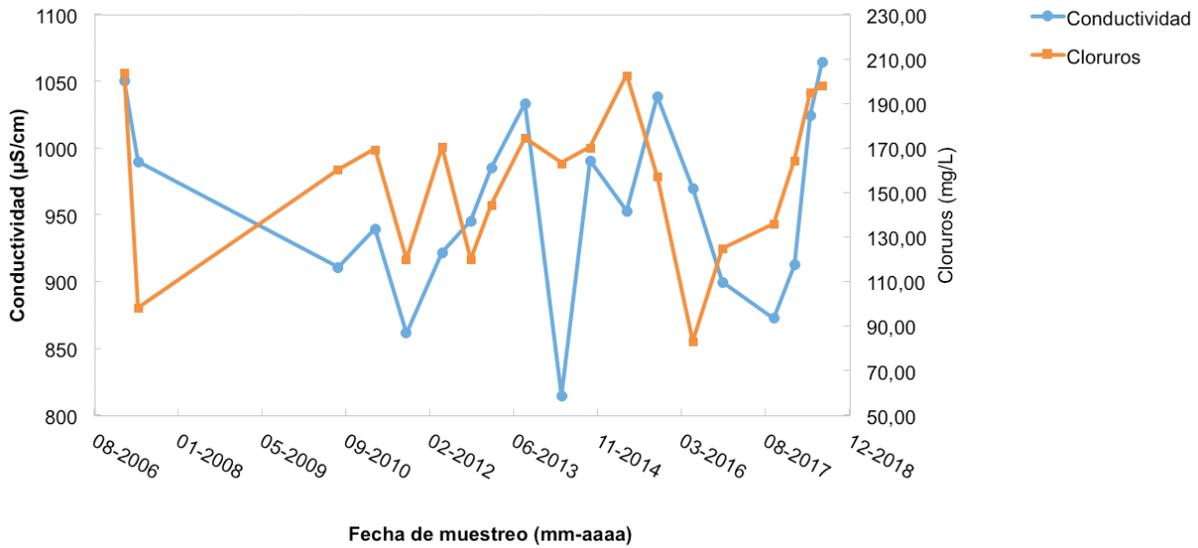
**Figura 3.** Tendencia histórica de conductividad y cloruros para el Pozo Socorrito 1 en Puntarenas.

**Cuadro 6.** Resultados de los indicadores para el Pozo Socorrito 1 en Puntarenas.

Indicador	$\frac{\text{Cl}}{\text{CO}_3 + \text{HCO}_3}$	$\frac{\text{Ca}}{\text{Mg}}$	$\frac{\text{Na}}{\text{Cl}}$	BEX (meq/L)	SDT (mg/L)
Valor	0.2	2.56	0.87	0.2	340
Observación	Agua de buena calidad	No salinizado	Ni salinizado ni contaminado	No intrusión salina	Agua no salobre

#### Caso 4. Pozo 3 en Bolsón de Ortega

En la Figura 4 se muestra la tendencia histórica de 19 muestreos efectuados desde el 2006 hasta el 2018, para la concentración de cloruros y conductividad en el Pozo 3 en Bolsón de Ortega. Como se puede observar la conductividad oscila entre 800 µS/cm y 1000 µS/cm sin ninguna tendencia definida, igual sucede para la concentración de cloruros la cual oscila entre 60 mg/L y 200 mg/L. Valores tan altos en la conductividad suelen asociarse con el mito de intrusión salina, sin embargo, los datos históricos de los últimos 12 años no indican tendencia a incremento y, por lo tanto, según este indicador no debería considerarse como un pozo salinizado. En el cuadro 7 se muestran los resultados de los demás indicadores, según la razón de Simpson, existe contaminación entre leve y moderada (no precisamente por intrusión salina). La concentración de magnesio no fue lo suficientemente alta, en comparación con el calcio, para que el indicador calificara el agua con intrusión. La relación Na/Cl no indicó intrusión ni contaminación antropogénica. Los sólidos disueltos totales califican el agua del pozo en alerta, a punto de ser agua salobre. El único indicador que no coincidió con los demás fue el BEX, el cual calificó el agua como salinizada, siendo en realidad mineralizada.



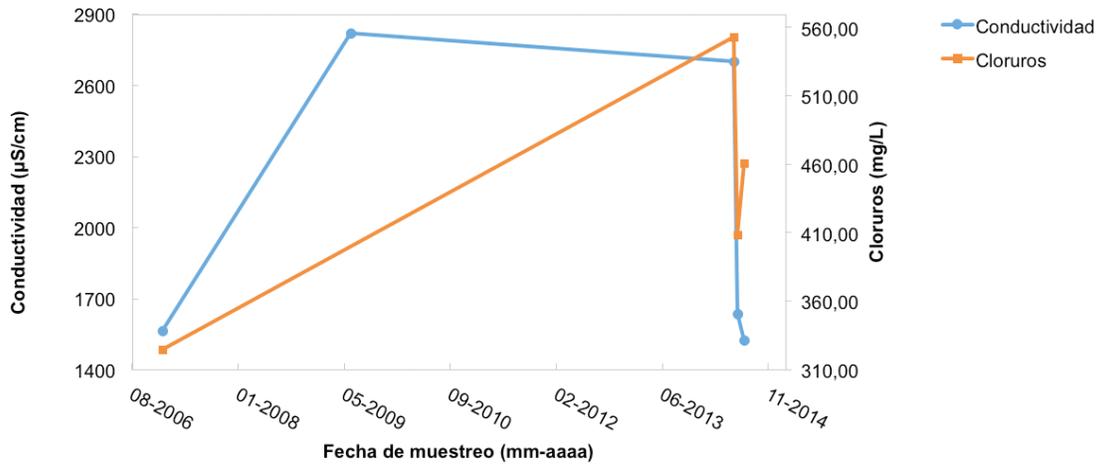
**Figura 4.** Tendencia histórica de conductividad y cloruros para el Pozo 3 en Bolsón de Ortega.

**Cuadro 7.** Resultados de los indicadores para el Pozo 3 en Bolsón de Ortega.

Indicador	$\frac{Cl}{CO_3+HCO_3}$	$\frac{Ca}{Mg}$	$\frac{Na}{Cl}$	BEX (meq/L)	SDT (mg/L)
Valor	1.3	1.39	0.32	-3.3	878
Observación	Contaminación entre leve y moderada	No existe potencial de intrusión salina	No indica intrusión salina ni contaminación antropogénica	Impacto de intrusión salina	Agua no salobre, pero en alerta

### Caso 5. Pozo AB 2330 en La Uruca

Este pozo nunca ha estado en uso, debido a que desde que se perforó presentó calidad de agua no apta para consumo humano. Así como se puede observar en el cuadro 3, el agua posee altas concentraciones de arsénico, cloruros, hierro, magnesio, potasio y sodio, lo cual incumple con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable [12]. Por otro lado, en la figura 5, se puede observar la gráfica de tendencia histórica. Los resultados de muestreos han presentado conductividades entre 1500 µS/cm y 2800 µS/cm y cloruros entre 320 mg/L y 550 mg/L, aunque es posible ver un gran incremento en la conductividad y los cloruros en los primeros tres muestreos, no se mantiene la tendencia, sino por el contrario, los parámetros vuelven a disminuir. Para este caso, no pareciera que la tendencia histórica sea el indicador más adecuado, ya que posee pocos valores y existe diferencia de hasta 5 años entre un muestreo y otro.



**Figura 5.** Tendencia histórica de conductividad y cloruros para el Pozo AB 2330 en La Uruca.

**Cuadro 8.** Resultados de los indicadores para el Pozo AB 2330 en La Uruca.

Indicador	$\frac{\text{Cl}}{\text{CO}_3 + \text{HCO}_3}$	$\frac{\text{Ca}}{\text{Mg}}$	$\frac{\text{Na}}{\text{Cl}}$	BEX (meq/L)	SDT (mg/L)
Valor	2.3	0.81	0.97	0.8	1137
Observación	Contaminación evidente	Impacto de intrusión salina	Cercano a 1, indica contaminación de otro tipo	No intrusión salina	Agua salobre

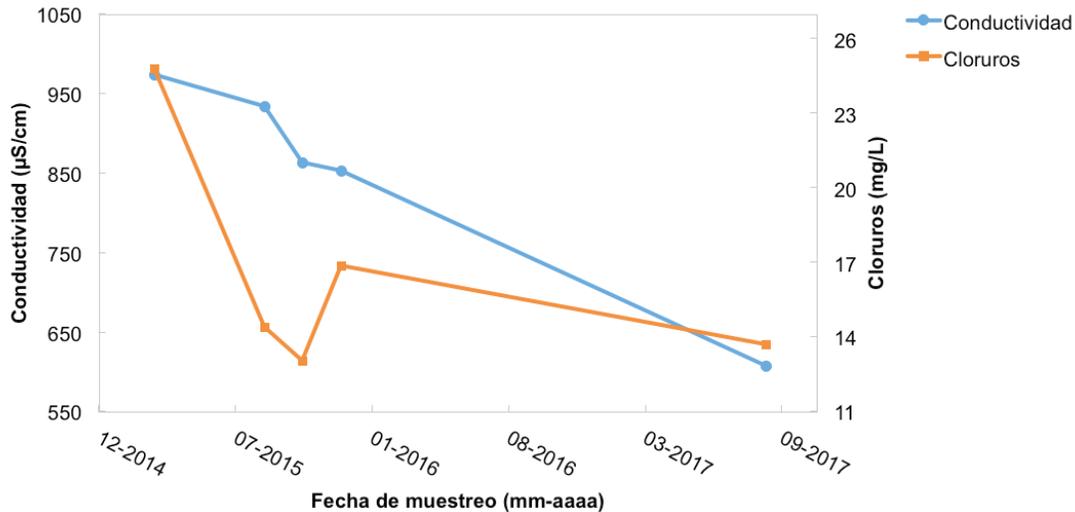
Un dato importante en relación a este pozo, es que no se ubica en una zona costera, posee una profundidad aproximada de 300 m y en ocasiones la temperatura del agua es superior a 30°C, por lo que de antemano se conoce que la intrusión de agua de mar debe quedar descartada. No obstante, la información que se genere con los resultados de los indicadores es muy valiosa para poder validarlos.

Analizando los resultados del cuadro 8, se puede observar como la mayoría de los indicadores denotan que existe contaminación, lo cual no deja estar correcto debido a la cantidad de minerales que posee el agua. Es importante destacar los resultados de la relación Na/Cl, para este caso, ya que este indicador puede ser la clave para detectar que la contaminación no es por intrusión salina, pues el valor obtenido es cercano a 1, indicando que la contaminación se debe a otros factores. Por otro lado, el indicador BEX, obtuvo un resultado positivo, lo cual indica que existe recuperación del acuífero.

### Caso 6. Pozo 7 en Santa Teresa de Cóbano

En la figura 6 se muestra la tendencia histórica del Pozo 7 en Santa Teresa de Cóbano, este pozo ha presentado conductividades desde 600 µS/cm a 1000 µS/cm y cloruros alrededor de 20 mg/L. Por el alto nivel de conductividad del agua se ha juzgado al pozo de poseer intrusión salina; sin embargo, observando la tendencia histórica se puede notar como no ha habido un aumento la concentración de los dos parámetros, sino por el contrario, una disminución de los mismos.

Para obtener los resultados de los demás indicadores se escogió el segundo muestreo, ya que en ese entonces el agua presentaba una conductividad de 974  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



**Figura 6.** Tendencia histórica de conductividad y cloruros para el Pozo 7 en Santa Teresa de Cóbano.

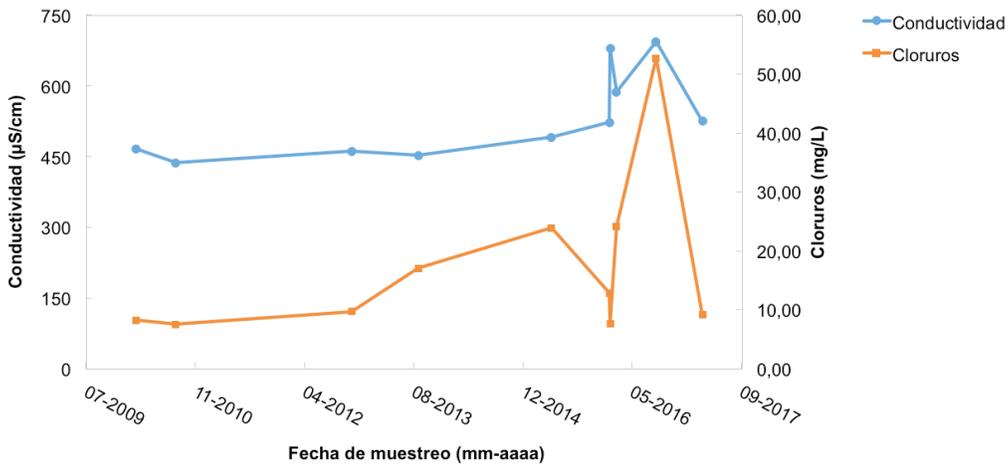
**Cuadro 9.** Resultados de los indicadores para el Pozo 7 en Santa Teresa de Cóbano

Indicador	$\frac{\text{Cl}}{\text{CO}_3+\text{HCO}_3}$	$\frac{\text{Ca}}{\text{Mg}}$	$\frac{\text{Na}}{\text{Cl}}$	BEX (meq/L)	SDT (mg/L)
Valor	0.1	1.85	12.73	8.7	709
Observación	Agua de buena calidad	No salinizado	Contaminación de otro tipo	No intrusión salina	Agua no salobre, pero en alerta

Los resultados de los indicadores mostrados en el cuadro 9, concuerdan entre sí, indicando en general que el pozo no posee intrusión salina, pero que, sí posee otro tipo de contaminación debido al alto contenido de sodio respecto a los cloruros. Como se puede observar en el cuadro 3, el agua del pozo tiene la peculiaridad de ser muy alcalina, con alto contenido bicarbonatos, lo que genera el nivel alto de conductividad.

### Caso 7. Pozo Jobo 2 en Tamarindo

En la figura 7 se puede observar la tendencia histórica del Pozo Jobo 2 en Tamarindo, en la gráfica es notorio como del 2010 al 2015 la concentración de cloruros y el nivel de conductividad se mantuvo casi constante, posteriormente en los muestreos efectuados en el 2016 hubo un aumento en ambos parámetros, principalmente de cloruros los cuales aumentaron hasta cuatro veces, posteriormente en el 2017 los valores volvieron a disminuir. Analizando la tendencia, específicamente el pico del 2016, se podría relacionar con indicios de intrusión salina o con periodo de sequía, lo cual provoca que se concentren los iones disueltos en el agua. Por otro lado, se denota la importancia de continuar vigilando si existe algún aumento de dichos parámetros en los próximos años.



**Figura 7.** Tendencia histórica de conductividad y cloruros para el Pozo Jobo 2 en Tamarindo.

Para el análisis con los demás indicadores, se utilizó los resultados del muestreo que resultó con mayor concentración de cloruros (52.71 mg/L), esto con la finalidad de determinar si el pico de la tendencia es o no un indicio de intrusión salina. En el cuadro 11 se muestran los resultados, se puede observar como tres de los indicadores indican que el agua no posee impacto por intrusión salina. El indicador BEX, a pesar de estar negativo, su valor es casi 0, lo que podría indicar un inicio de contaminación, mientras que la relación Na/Cl no indica intrusión salina ni contaminación antropogénica.

**Cuadro 11.** Resultados de los indicadores para el Pozo 7 en Santa Teresa de Cóbano.

Indicador	Cl	Ca	Na	BEX (meq/L)	SDT (mg/L)
	CO <sub>3</sub> +HCO <sub>3</sub>	Mg	Cl		
Valor	0.4	1.17	0.40	-0.2	363
Observación	Agua de buena calidad	No salinizado	No indica intrusión salina ni contaminación antropogénica	Impacto de intrusión salina	Agua no salobre

## Conclusiones y recomendaciones

- El indicador de tendencia histórica es muy útil, sin embargo, en ocasiones no se posee información de muestreos consecutivos en un periodo de tiempo extenso, por lo que es necesario recurrir a los demás indicadores aplicables a análisis puntuales.
- La tendencia histórica es un excelente indicador para obtener una primera impresión de cómo se ha estado comportando el acuífero, mientras que los demás indicadores con resultados puntuales funcionan para corroborar lo estimado en la tendencia.
- La razón de Simpson posee la ventaja que permite determinar el grado de contaminación que posee el acuífero, aunque en ocasiones dicha contaminación puede significar agua mineralizada.
- La relación Ca/Mg identificó algunas aguas con impacto por intrusión salina.

- La relación Na/Cl es un indicador clave para discernir si la contaminación que pueden mostrar los otros indicadores, se debe a otras causas ajenas a la intrusión salina.
- Los SDT son un indicador alerta, ya que indican cuando el agua está cerca de convertirse en salobre.
- Debido a que la calidad de agua se puede ver afectada por factores como: condiciones climáticas, tiempo de contacto, permeabilidad del suelo, y recorrido en los estratos geológicos, siempre es fundamental analizar integralmente cada caso.
- Se recomienda consultar la referencia original al momento de interpretar casos de calidad de agua, con el fin de generar un criterio más profundo para cada caso; es importante considerar la diferencia entre agua salobre y agua salada.

## Referencias

- [1] F. Abdalla, «Ionic ratios as tracers to assess seawater intrusion and to identify salinity sources in Jazan coastal aquifer,» *Saudi Society for Geosciences*, pp. 9-40, 2015.
- [2] A. Scheidleder, Indicator fact sheet: saltwater intrusion, European Environment Agency: EEA, 2003.
- [3] K. Todd, Groundwater hydrology., Primera ed., New York: John Wiley & Sons, 1959.
- [4] A. Hounslow, Water quality data: analysis and interpretation, Boca Ratón: CRC Press, 1995.
- [5] M. Moujabber y et al, «Comparison of different indicators for groundwater contamination by seawater intrusion on the lebanese coast.,» *Water Resources Management*, n° 20, pp. 161-180, 2006.
- [6] J. Klassen y et al, Chemical indicators of saltwater intrusion for the Gulf Islands, British Columbia, Canadá: Ministerio de Ambiente de Columbia Británica, 2014.
- [7] R. Srinivas y G. Nageswararao, «Assessment of groundwater quality using water quality index,» *Archives of Environmental Science*, n° 7, pp. 1-5, 2013.
- [8] P. Stuyfzand, Base exchange indices as indicators of salinization or freshening of (coastal) aquifers, Florida: 20th Salt water intrusion meeting, 2008.
- [9] R. Crittenden, MHW's water treatment: principles and design, Tercera ed., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [10] E. Custodio y M. Llamas, Hidrología subterránea, Primera ed., Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1976.
- [11] American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23 ed., Washington, 2017.
- [12] Decreto Ejecutivo N° 38924-S, Reglamento para la Calidad del Agua Potable., San José: Diario Oficial La Gaceta, 2015.