

Agua subterránea en regiones costeras

En una región costera el agua subterránea bajo el continente es dulce¹ y el agua subterránea bajo el mar es salada (Figura 1). Parecería lógico que estos dos tipos de agua se mezclaran bajo la línea de costa, pero afortunadamente no es así.

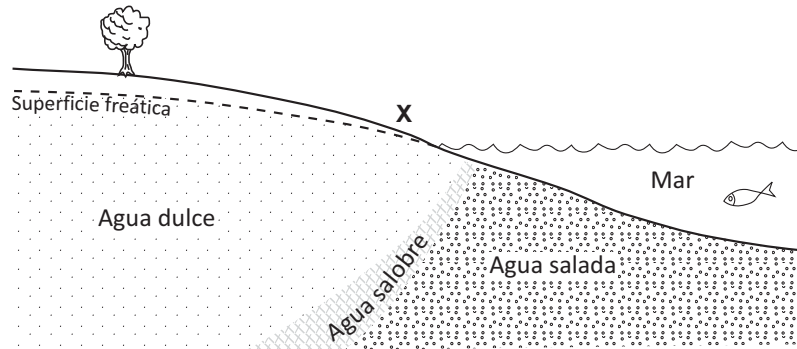


Figura 1.- Agua dulce y agua salada bajo la línea de costa

Lo mostrado en la figura 1 se conoce porque si se realiza un sondeo vertical en el punto X en los primeros metros se encuentra agua dulce, después agua salobre y finalmente agua salada.

Esta situación puede mantenerse indefinidamente porque es un sistema dinámico (figura 2): constantemente el agua dulce y el agua salada se mezclan formando la franja intermedia de agua salobre, llamada *zona de mezcla* o *interfase*, que asciende hacia la línea de costa.

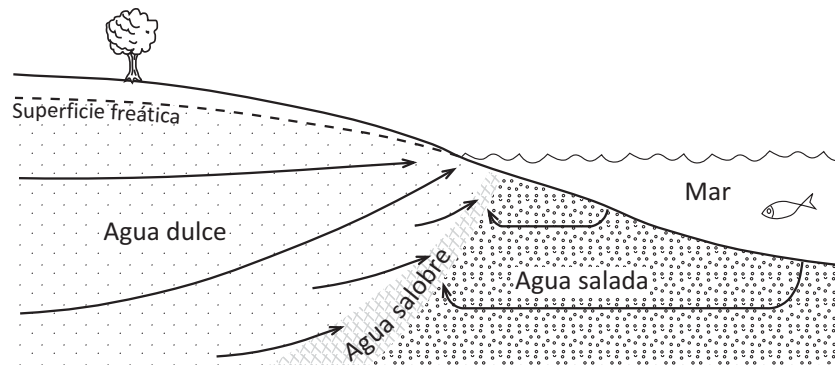


Figura 2.- El agua dulce y el agua salada se mueven para formar la interfase

Dentro de la interfase el agua salobre asciende hacia el mar. Por tanto, constantemente se pierde agua dulce al océano, pero es el tributo que el continente debe pagar para que el agua salada no penetre más adentro. El espesor de la interfase es menor cuanto mayor es el flujo ascendente (Custodio, 1983, p.1322).

Considerando que la superficie freática en el continente está más alta que el nivel del mar, podríamos pensar que el empuje del agua dulce es mayor y que la interfase debería curvarse hacia el mar en lugar de inclinarse hacia el continente. Esto no sucede debido a la mayor densidad del agua salada. Si

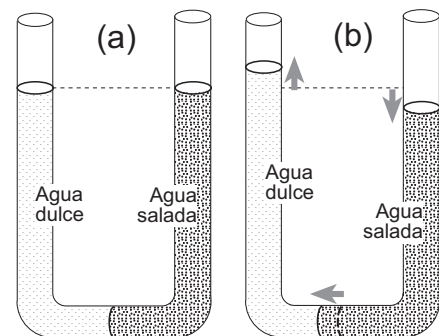


Figura 3.- En unos vasos comunicantes el agua salada quedaría más abajo por su mayor peso específico

¹ El agua de baja salinidad en español se denomina *dulce* aunque no sea dulce, en inglés se dice *fresh water*

en unos vasos comunicantes colocáramos agua dulce y salada (suponiendo que no se mezclaran, figura 3a), el mayor peso específico del agua salada haría que el equilibrio se alcanzara como se muestra en la figura 3b.

Ley de Ghyben-Herzberg

Aunque la interfase tiene un espesor considerable, para la deducción analítica que busca expresar su forma, consideramos que se tratara de una superficie neta.

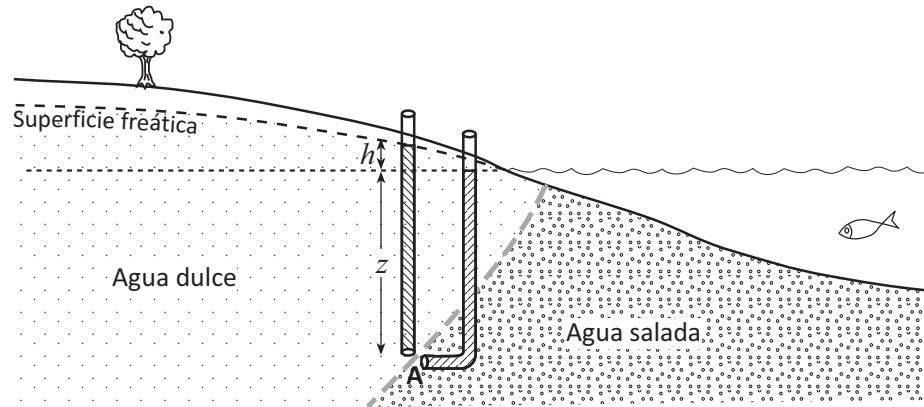


Figura 4.-Planteamiento de la Ley de Ghyben-Herzberg

La primera explicación analítica de este fenómeno fue aportada por Ghyben y Herzberg (1889-1901), y es conocida como *ley de Ghyben-Herzberg*². Consideremos el equilibrio alcanzado en el punto A (figura 4), situado a una cota z bajo el nivel del mar, y para ello imaginamos dos tubos piezométricos abiertos a ambos lados de la interfase. El peso de la columna de agua salada (tubo a la derecha) será igual a la altura de la columna de agua (z) por el peso específico del agua salada (γ_s). Análogamente, el peso de la columna de agua dulce (tubo a la izquierda) es igual a la altura de la columna de agua ($z+h$) por el peso específico del agua dulce (γ_d). Como en el punto A se ha alcanzado el equilibrio, ambas presiones son iguales:

$$(z+h) \cdot \gamma_d = z \cdot \gamma_s \quad (1)$$

Despejando z resulta:

$$z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \cdot h \quad (2)$$

Donde: z = cota (valor absoluto) del punto considerado A (figura 4)

h = cota de la superficie freática en la vertical del punto A

γ_s = peso específico del agua salada

γ_d = peso específico del agua dulce

Mediante la ecuación (2) podemos evaluar a qué profundidad se encuentra la interfase en un punto cualquiera de la costa, midiendo el valor h en un pozo superficial.

Ejemplo.- En un punto próximo a la línea de costa existe un pozo en el que la superficie freática se encuentra 1,85 metros sobre el nivel del mar. Sabemos que este pozo no alcanza la interfase porque obtiene agua dulce. Calcular a qué profundidad (respecto de la cota 0) se encuentra el agua salada en ese punto. [$\gamma_d = 1,00$, $\gamma_s = 1,025$].

Solución: Aplicando la expresión (2):

$$z = \frac{1}{1,025 - 1} \cdot 1,85 = 74 \text{ metros}$$

² Citado en casi todos los manuales, por ejemplo, Freeze y Cherry, 1979, p. 376; Fetter, 2001, p. 331.

Corrección de Hubbert

Hubbert (1940, en Custodio, 1983, p.1321) hizo notar que la altura de la superficie freática correspondiente al punto A no es precisamente la que medimos en la vertical de A, sino que hay que considerar la línea equipotencial que pasa por ese punto A (figura 5). En la fórmula (2) para el valor de h_d no hay que utilizar la altura del punto A' sobre el nivel del mar, sino la altura de B. A y B están en la misma equipotencial, por tanto el potencial hidráulico de A corresponde a la altura de B³

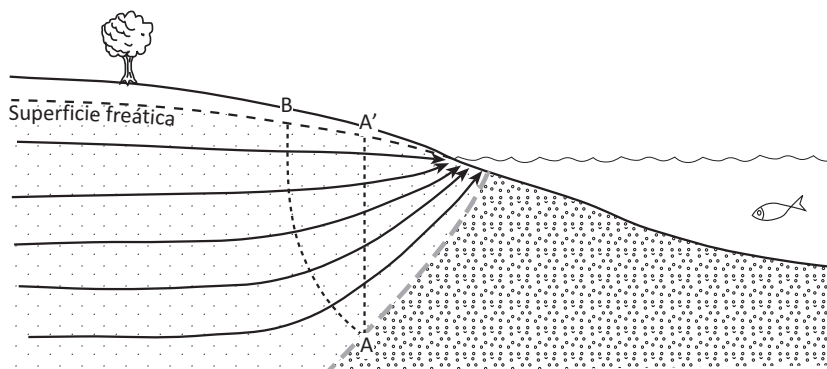


Figura 5.- Consideración correcta del potencial del agua dulce en un punto de la interfase

Fórmula de Hubbert

Posteriormente, Hubbert (1963, en Custodio, 1983, p. 1324) señaló otro error más importante en la ley de Ghyben-Hezberg (figura 6): en el punto A la altura de la columna de agua salada no es z , sino que es menor, ya que el agua ha perdido cierta energía para desplazarse desde M hasta A.

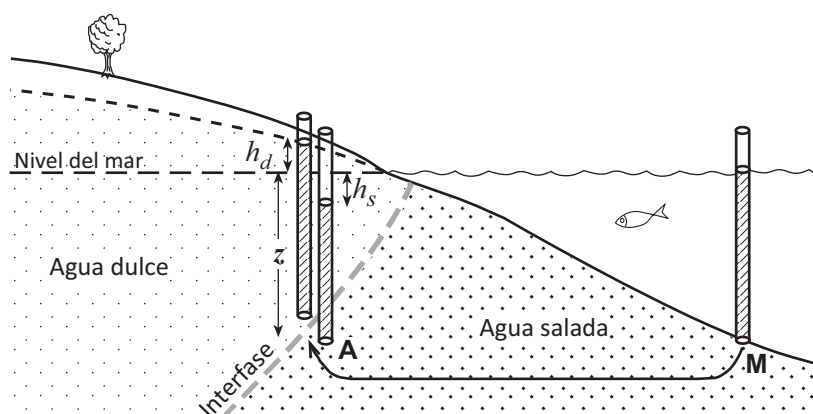


Figura 6.- Planteamiento de la fórmula de Hubbert

Si podemos medir la altura de la columna de agua por debajo de la interfase, observamos que es inferior al nivel del mar (h_s en la figura 6). Teniendo en cuenta esta variable, repetimos el equilibrio de la expresión (1) y obtenemos⁴:

$$(z + h_d) \cdot \gamma_d = (z + h_s) \cdot \gamma_s \quad (3)$$

Despejando z resulta:

$$z = h_d \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} - h_s \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_d} \quad (4)$$

³ Este diseño del flujo es simplificado porque tanto la interfase como la superficie freática parecen comportarse como líneas de flujo, y estrictamente no es así en ninguno de los dos casos.

⁴ En esta expresión (3) el nivel bajo la interfase aparece como $+h_s$. Al aplicar la fórmula introduciremos para h_s un valor negativo.

Observamos que el primer sumando es la fórmula de Ghyben-Herzberg, y que la modificación aparece en el segundo sumando, que depende del valor de h_s , que no había sido tenido en cuenta. Aunque el segundo sumando en (4) aparece con signo menos, como el valor de h_s será negativo, el segundo sumando se hace positivo, es decir que esta corrección aumenta la profundidad calculada de la interfase mediante la fórmula de Ghyben-Herzberg.

Ejemplo.- En un punto próximo a la línea de costa existe un pozo en el que la superficie freática se encuentra 1,85 metros sobre el nivel del mar. En un sondeo abierto por debajo de la interfase el nivel del agua está 0,50 metros por debajo del nivel del mar. Calcular a qué profundidad se encuentra el agua salada en ese punto. [$\gamma_d = 1,00$, $\gamma_s = 1,025$].

Solución: Aplicando la expresión (4):

$$z = 1,85 \cdot \frac{1}{1,025 - 1} - (-0,50) \cdot \frac{1,025}{1,025 - 1} = 94,5 \text{ metros}$$

Otras complicaciones

Todo lo anterior conlleva una gran simplificación del proceso natural, no teniendo en cuenta la dispersión hidrodinámica, la difusión, la densidad variable ni la salinidad variable. (Curso Internacional de Hidrología Subterránea, 2009).

También se ha supuesto implícitamente que la geología es homogénea y que el acuífero es libre. Todas las complejidades de la geología se traducirán en variaciones de la forma y posición de la interfase.

Si se trata de un acuífero confinado, la situación puede ser similar al caso del acuífero libre (figura 7b). Pero si el potencial hidráulico en el acuífero es suficientemente alto, no permitirá la existencia de una cuña de agua salada (figura 7a). También puede suceder lo contrario, que la interfase penetre en el acuífero y no exista pérdida de agua dulce al mar (figura 7c).

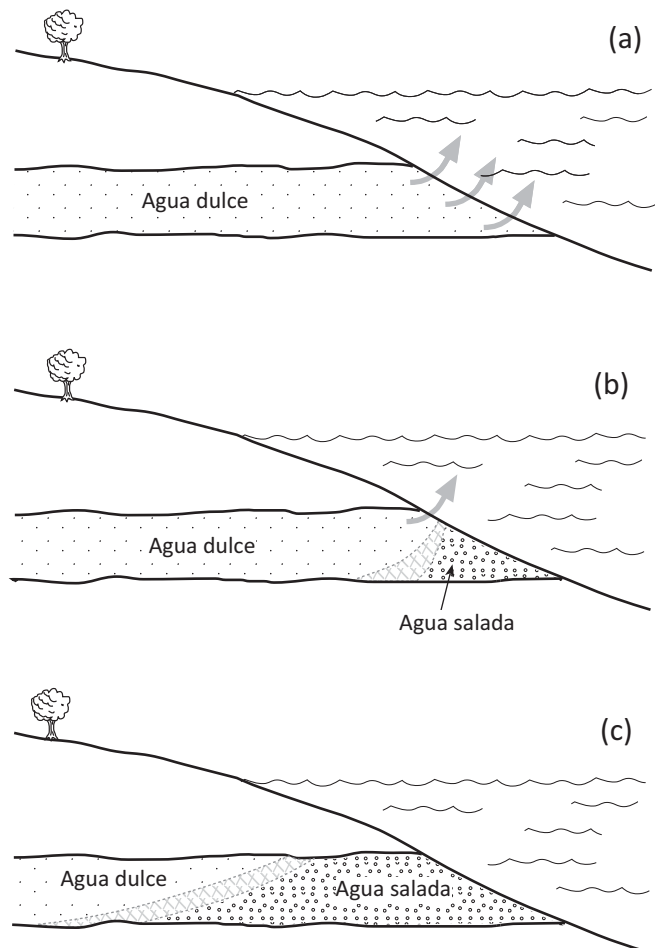


Figura 7.- Tres posibles situaciones de la interfase en acuíferos confinados.

Efectos de la explotación de agua subterránea

De manera esquemática, pueden establecerse diversas zonas de peligro de salinización (Custodio y Brugeman, 1987, p.98), que se representan en la figura 8.

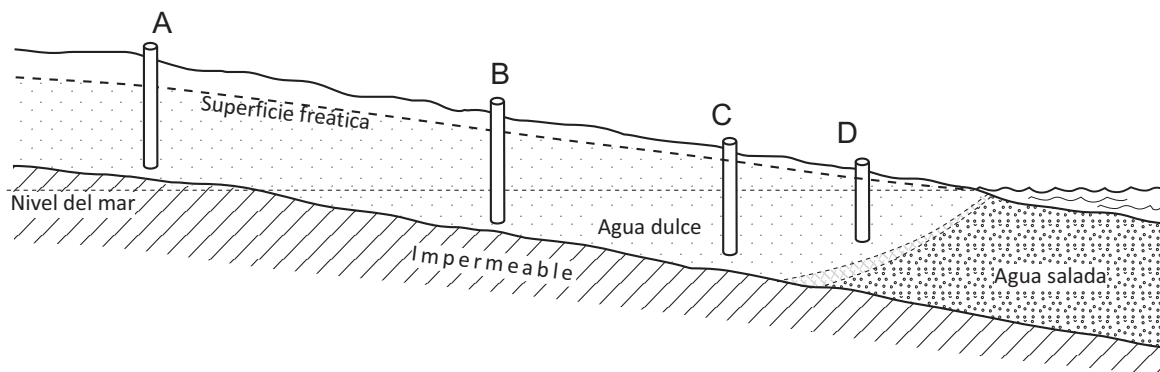


Figura 8.- Diferentes zonas de riesgo de salinización (Custodio y Brugeman, 1987)

El pozo A está lejos de la costa y todo el espesor del acuífero está por encima del nivel del mar. No existe un riesgo directo de salinización, aunque una fuerte extracción causará un descenso de la superficie freática, disminuirá el flujo hacia la costa, lo que a su vez aumentará la vulnerabilidad de las zonas siguientes.

El pozo B está lejos de la costa y de la cuña de agua salada, pero parte del acuífero está bajo el nivel del mar. Una explotación prolongada y superior a la recarga natural puede ayudar a la intrusión de la interfase con lo que el agua salada podría llegar a alcanzar la captación.

El pozo C está cerca de la costa, pero separado de la interfase. El bombeo fuerte y prolongado acabará provocando el avance de la interfase.

El pozo D está sobre la interfase. El descenso de la superficie freática causado por cualquier bombeo, aunque no sea un caudal elevado, causará el consiguiente ascenso de la interfase (figura 9), pudiendo llegar a la extracción de agua salada. Como la posición de la interfase responde a un equilibrio entre la altura de la columna de agua dulce y la de agua salada, es evidente que cualquier disminución de la altura del agua dulce ocasionará una elevación de la interfase.

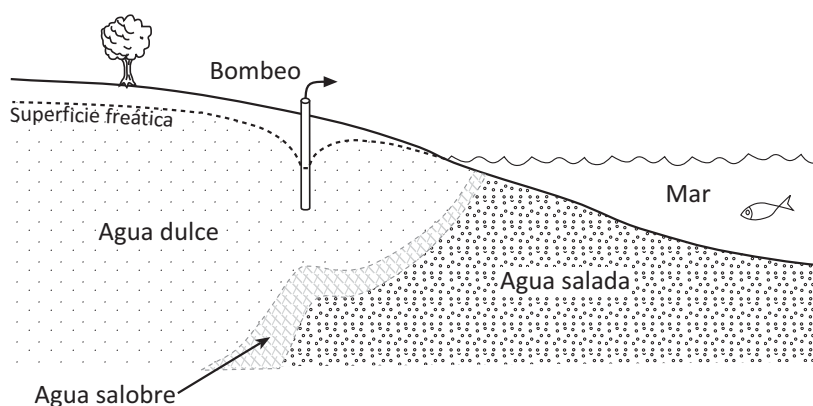


Figura 9.- Un descenso en la superficie freática provoca el correspondiente ascenso de la interfase

Cuando la elevación de la interfase que se muestra en la figura 9 es muy pronunciada y el agua salobre llega a alcanzar la captación, se denomina *upconing* (Custodio y Brugeman, 1987, p.102).

En las zonas marcadas con las captaciones B y C, un bombeo no provocará directamente un ascenso del agua salada como el mostrado en la figura 9, pero las extracciones captarán parte del flujo subterráneo que anteriormente discurría hacia el mar (figura 10), haciendo descender la superficie freática y provocando el avance de la cuña de agua salada.

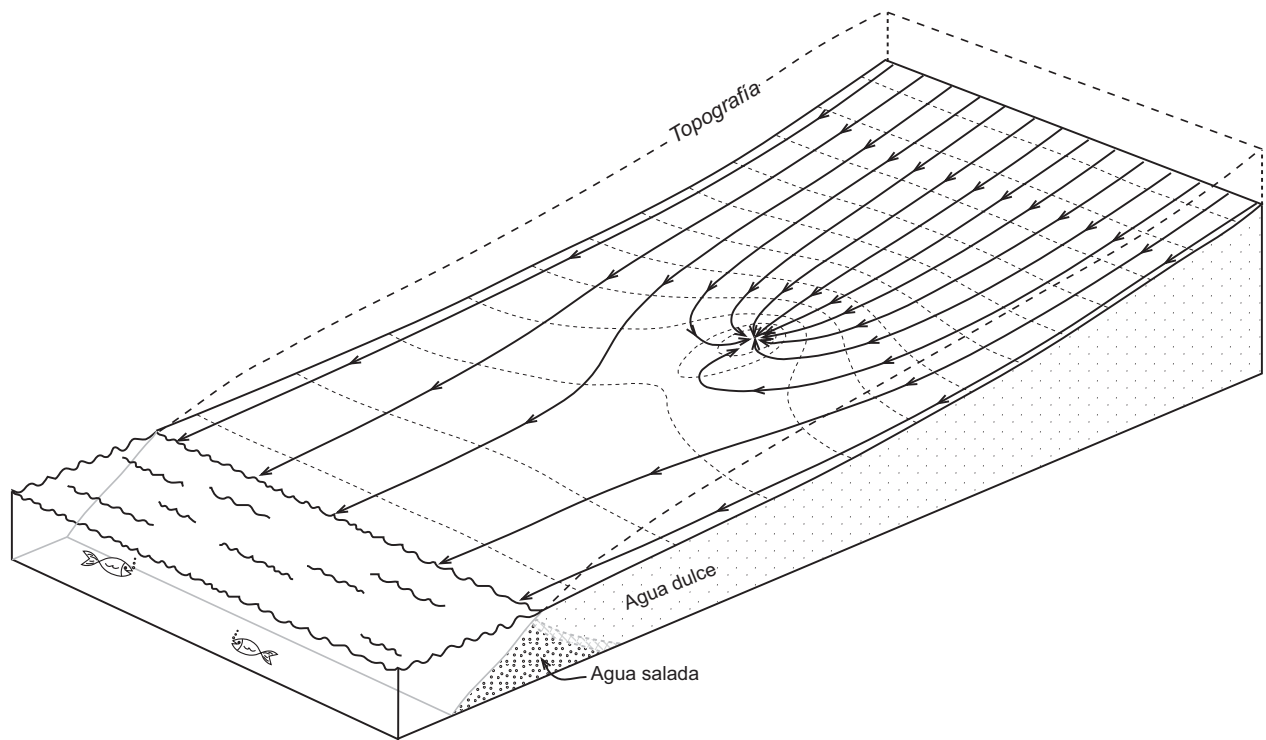


Figura 10.- Una captación (en el centro) disminuye el flujo de agua subterránea hacia la costa y la altura de la superficie freática en la proximidad de la misma.

Explotación del agua subterránea y medidas contra la intrusión del agua salada

Las zonas costeras normalmente presentan una necesidad importante de agua, que muchas veces es necesario abastecer mediante aguas subterráneas. Aunque es evidente que cualquier extracción de agua subterránea provoca, o al menos favorece, la intrusión de la cuña de agua salada, será necesario afrontar la explotación con una extremada cautela, atendiendo a la distancia hasta la línea de costa, profundidad de las captaciones y volúmenes bombeados.

Custodio (op. cit.) sugiere la conveniencia de captaciones horizontales poco profundas y muy próximas a la línea de costa, de modo que puedan bombear el agua que ya ha cumplido su función de mantener la posición de la interfase.

Para detener la intrusión se ha intentado la recarga artificial mediante canales o zanjas, paralelamente a la línea de costa para provocar una elevación de la superficie freática, utilizando agua procedente de depuración.

Bibliografía

- Custodio, E. (1983).- Relaciones agua dulce-agua salada en regiones costeras. In: E. Custodio y M. R. Llamas (Eds.), *Hidrología Subterránea*. (2 tomos), pp. 1313-1389, Omega.
- Custodio, E. y G.A. Bruggeman (1987).- *Groundwater problems in coastal areas*, Studies and Reports in Hydrology, 45, UNESCO, 596 pp..
- Curso Internacional de Hidrología Subterránea (2009).- *Hidrogeología*. Fundación Centro Internacional Hidrología Subterránea, 768 pp.