

APLICACIÓN DE LA TENDENCIA INCRUSTANTE TEÓRICA A UN PROYECTO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA

Andrés Steckinger, Darío Dube - PEREZ COMPANC S.A. – Argentina

RESUMEN

A fin de seleccionar el agua de inyección adecuada a utilizar en un proyecto de recuperación secundaria en una de las principales formaciones productoras del yacimiento, se realiza el estudio de compatibilidades de agua.

La tendencia incrustante se obtuvo partiendo de los índices de Stiff y Davis para carbonato de calcio y de Skillman, McDonald y Stiff para sulfato de calcio. Definido el tipo de incrustación esperable, su estimación cuantitativa se determinó a través de la modificación de Valone y Skiller. Posteriormente se comparan las estimaciones de Oddo y Tomson con las predicciones de Stiff y Davis.

Tancurridos tres años de los estudios mencionados se evalúan los resultados obtenidos en el campo y se comparan con los resultados calculados a partir de los índices correspondientes. La validación de los mismos permite extender el uso del método hacia otros proyectos, destacándose la necesidad de basar el análisis, únicamente en una caracterización química representativa del agua correspondiente.

INTRODUCCION

Previo al inicio de la inyección de agua en una de las principales formaciones productoras del yacimiento Puesto Hernández se realiza un estudio de compatibilidad a través del índice de Stiff y Davis y de su representación cuantitativa con la modificación de Valone y Skiller para precipitación de carbonato de calcio, y el índice de Skillman, McDonald y Stiff para precipitación de sulfato de calcio con el objeto de seleccionar el agua a inyectar.

DESARROLLO

Se evalúa la tendencia incrustante de carbonato de calcio (CaCO_3) y sulfato de calcio (CaSO_4) por medio de los índices de Stiff y Davis y de Skillman, McDonald y Stiff, respectivamente. Se estudia la mezcla de aguas de producción con dos tipos posibles de agua a inyectar:

- a) Agua proveniente de la deshidratación del crudo, en adelante agua salada.
- b) Agua del Río Colorado, extraída desde pozos ubicados en la margen sur del río, en adelante agua dulce. Dicho río atraviesa el yacimiento en dirección N-S.

Dado que, en la zona cercana a los punzados se producirá la mezcla del agua de inyección con el agua de formación, se calculan los índices para distintos porcentajes de mezcla, simulando la variación temporal una vez comenzada la inyección. Los valores de presión y temperatura utilizados corresponden a los punzados.

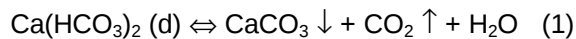
A los fines de caracterizar el agua de formación, se muestrearon los pozos productores involucrados en el proyecto. La **Tabla 1** muestra las características del agua de formación de los pozos estudiados (PH 0440, PH 0452, PH 0485, PH 0487, PH 0488, PH 0500, PH 0503, PH 0508, PH 0522, PH 0534 y PH 0553) y las dos opciones de agua de inyección. La ubicación de tales pozos respecto de los inyectores perforados se observa en la **Figura 1 (las capas productoras están identificadas con letras mayúsculas debajo de cada pozo)**.

Dada la diferencia en la composición de las aguas muestreadas, se calcularon los índices respectivos para cada pozo en particular en lugar de definir una composición tipo de la zona a inyectar.

La precipitación de carbonato de calcio puede darse tanto por variaciones en las condiciones operativas (temperatura y presión), así como por desestabilización producto de la mezcla de agua. Mientras que el sulfato de calcio precipita *fundamentalmente* por mezcla de aguas.

a) Incrustaciones de carbonato de calcio

La reacción de precipitación puede ejemplificarse mediante la siguiente ecuación:



La posibilidad de formación de incrustaciones aumenta con:

- la temperatura
- la disminución de la presión parcial de dióxido de carbono
- el incremento del pH de la solución
- la disminución de las sales totales disueltas
- la disminución de la presión del sistema

El índice de estabilidad de Stiff y Davis (SI) no tiene en cuenta la influencia de la presión del sistema o, lo que es lo mismo, la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) disuelto en solución. La interpretación del mismo es la siguiente:

SI < 0	no puede precipitar carbonato de calcio
SI = 0	solución saturada de carbonato de calcio
SI > 0	puede precipitar carbonato de calcio

Otro de los métodos aplicados es la estimación de Oddo y Tomson. Desarrollado posteriormente al anterior, calcula el índice de saturación (Is) incluyendo el efecto de la presión. Calcula el pH y considera tanto la presión total, como la variación de la presión parcial de dióxido de carbono. Su interpretación es idéntica al índice de Stiff y Davis.

a.1) Índice de Stiff y Davis

Los índices obtenidos se encuentran en la **Tabla 2**. Los mismos son positivos y en general superiores a la unidad, indicando la sobresaturación de la mezcla de aguas o, lo que es lo mismo, establece la posibilidad de deposición de carbonato de calcio tanto para agua dulce como salada.

No obstante, la diferencia numérica entre los dos tipos de agua es muy pequeña y no permite establecer cual alternativa sería peor o con consecuencias más graves.

Por lo tanto, se decidió ensayar en el campo comenzando con *la inyección de agua salada en tres pozos del proyecto*.

Paralelamente se cuantificó teóricamente la cantidad de CaCO_3 que precipitaría para cada tipo de agua mediante la modificación de Valone y Skiller.

a.2) Estimación cuantitativa de la formación de incrustaciones

Partiendo de la reacción general de precipitación (1) Valone y Skiller definen la cantidad máxima de carbonato de calcio con posibilidades de precipitar expresada en mg/lit, de la siguiente manera:

$$P \text{ (mg/lit)} = 50,000 \left[G - \sqrt{X^2 + 4(10^{k-\text{pH}})} \right] \quad (2)$$

G: $\text{Ca}^{++} + \text{HCO}_3$, mol/lit

X: $\text{Ca}^{++} - \text{HCO}_3$, mol/lit

k: Stiff y Davis "k"

pH: pH del sistema

Posteriormente y basados en experiencia de campo utilizan la ecuación (2) para anticipar la severidad de la precipitación de carbonato de calcio:

P < 0	no hay precipitación
0 < P < 285	problemas mínimos de incrustación
285 < P < 715	precipitación moderada
P > 715	incrustaciones severas

Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 2** y en las **Figuras 2 a 12**.

En todos los casos el agua salada precipita cantidades de carbonato de calcio sensiblemente superiores a las generadas por el agua de inyección dulce aún cuando el índice a 100 % de agua de inyección sea inferior. En general, esta diferencia aumenta con el porcentaje de agua de inyección en la mezcla.

Así mismo, considerando la presencia de agua de formación en la zona cercana al pozo inyector, en el inicio de la inyección (0% de agua de inyección), los valores calculados predicen que *los problemas de incompatibilidad serán mayores en la etapa inicial* (baja proporción de agua dulce en la mezcla) e irán disminuyendo con el tiempo.

a.3) Método de Oddo y Tomson

En general, el índice de Oddo y Tomson, indica solución sobresaturada, permitiendo deposición de carbonato de calcio. El detalle de los mismos se aprecia en la **Tabla 2**.

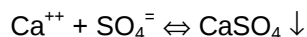
El índice promedio del total de pozos evaluados para las distintas mezclas de agua muestra una diferencia levemente superior en favor de la precipitación de carbonato de calcio con la inyección de agua salada con respecto a la inyección de agua dulce. Esta diferencia es aún menor que la resultante del índice de Stiff y Davis y no permite la selección del agua adecuada.

La cantidad máxima de carbonato de calcio a precipitar estimada en función de los cálculos de Oddo y Tomson (**Tabla 2**) es notablemente superior con la inyección de agua salada respecto de la inyección de agua dulce.

En este caso, la diferencia es mayor que la estimada por Stiff y Davis.

b) Incrustaciones de sulfato de calcio

La reacción de precipitación es la siguiente:



La posibilidad de formación de incrustaciones de sulfato de calcio aumenta con:

- la temperatura a partir de los 38 °C
- la disminución de sales disueltas hasta una concentración de 150 mg/l
- la disminución de la presión del sistema

El índice de Skillman, McDonald y Stiff, SRCaSO_4 , se define como:

$$\text{SRCaSO}_4 = \frac{\text{PI}}{\text{K}_{\text{PS}}}$$

PI: producto de las concentraciones de las especies reactivas

KPS: constante de solubilidad

Según el valor del índice utilizado, las posibilidades de precipitación son las siguientes:

$\text{SRCaSO}_4 > 1$ solución sobresaturada, puede precipitar sulfato de calcio

$\text{SRCaSO}_4 = 1$ solución saturada

$\text{SRCaSO}_4 < 1$ solución no saturada, no puede precipitar sulfato de calcio

El análisis de Skillman, McDonald y Stiff muestra que en ningún caso se obtiene solución saturada, indicando por lo tanto, la imposibilidad de generación de incrustaciones independientemente del agua a inyectar (Tabla 2).

Los antecedentes del yacimiento y la ausencia de sulfato de calcio en el proyecto de inyección confirman las predicciones teóricas.

Resultados de campo

En función de lo dicho anteriormente, se ensayó la inyección de agua salada en 3 pozos inyectores y luego la inyección de agua dulce en 6 pozos (incluyendo los 3 iniciales).

De esta forma, es posible comparar los resultados de la inyección de ambas aguas durante la etapa inicial del proyecto.

Las conclusiones principales son las siguientes:

- El volumen de agua dulce inyectada es 5.5 veces superior al agua salada para el mismo grupo de inyectoras. La Figura 13 muestra el total de agua inyectada en los primeros tres meses por cada grupo de inyectoras
- La relación caudal/presión es mayor en el caso de la inyección de agua dulce (Figura 14), lo cual indica una mejor inyectividad.
- Durante los 3 meses de inyección de agua salada se requirió realizar estimulaciones ácidas (HCl) frecuentes. En cada caso, el pozo inmediatamente después de la estimulación recuperaba su nivel de inyección indicando la presencia de incrustación con alto contenido de CaCO_3 . En la Figura 15 se muestra la cantidad de estimulaciones realizadas, para cada tipo de agua, en los 3 primeros meses respectivamente.

Basados en los resultados obtenidos, la inyección de agua dulce se extendió al total del proyecto de inyección. Durante un período de 30 meses se realizaron sólo cuatro estimulaciones ácidas, dos de las cuales sobre uno de los pozos que inicialmente había inyectado agua salada y en el período comprendido entre los seis meses posteriores al comienzo de la inyección de agua dulce.

Por otro lado, se pudo corroborar que el grado de complejidad calculado por los índices de Valone y Skiller, expresado como cantidad de incrustación a precipitar, correlacionó muy bien con los resultados de la prueba de campo.

CONCLUSIONES

El cálculo de la cantidad máxima de precipitación resulta muy útil para la selección del agua a utilizar en un proyecto de recuperación secundaria, especialmente cuando los índices de tendencia incrustante son similares.

La severidad comparativa de la deposición de carbonato de calcio esperable resulta confirmada por los resultados de campo.

El índice de Skillman, McDonald y Stiff indica la imposibilidad de precipitación de sulfato de calcio tal como indican los antecedentes del yacimiento al respecto.

BIBLIOGRAFIA

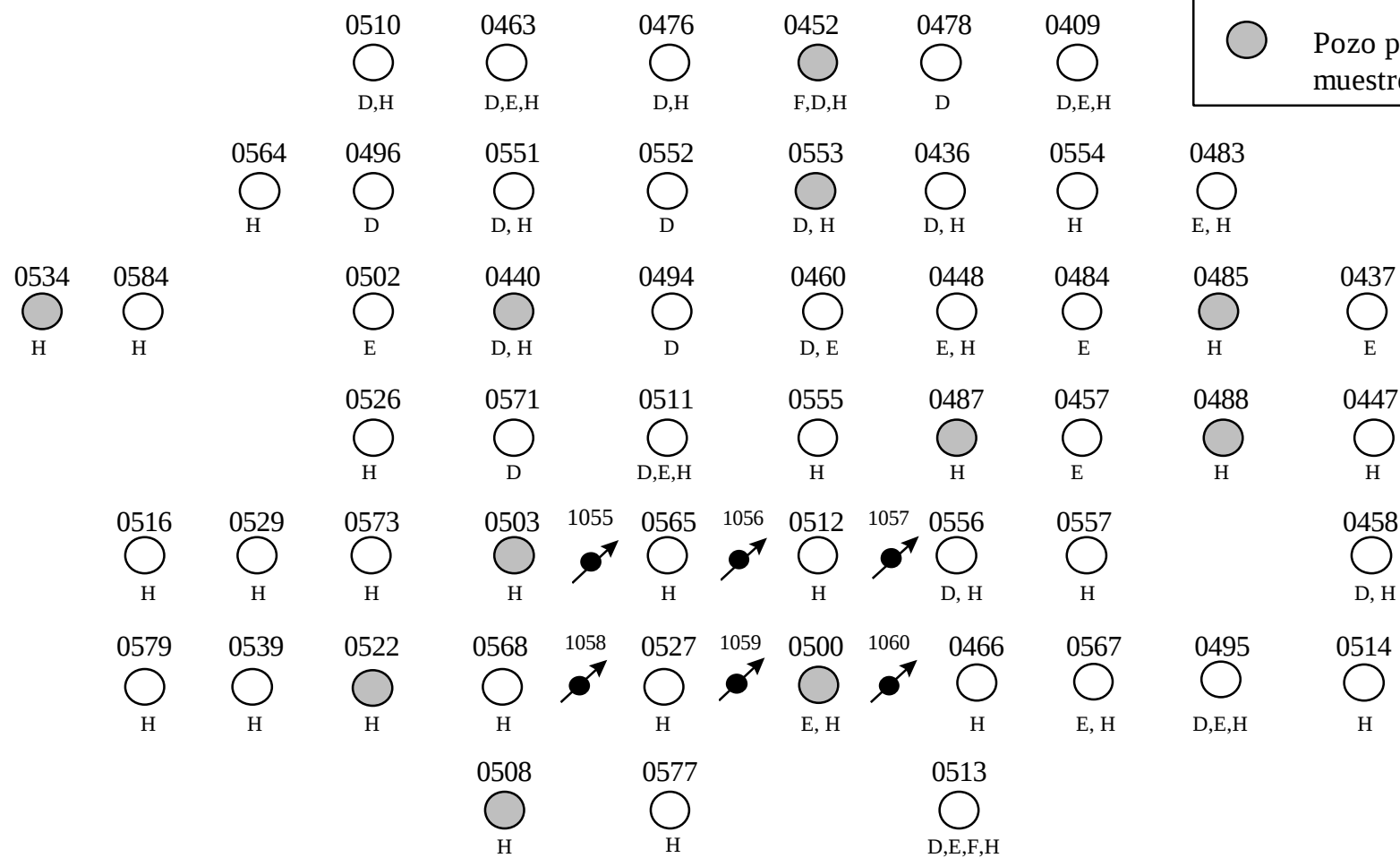
Charles C. Patton, "Applied water technologies", 1ra edición, Junio 1986.

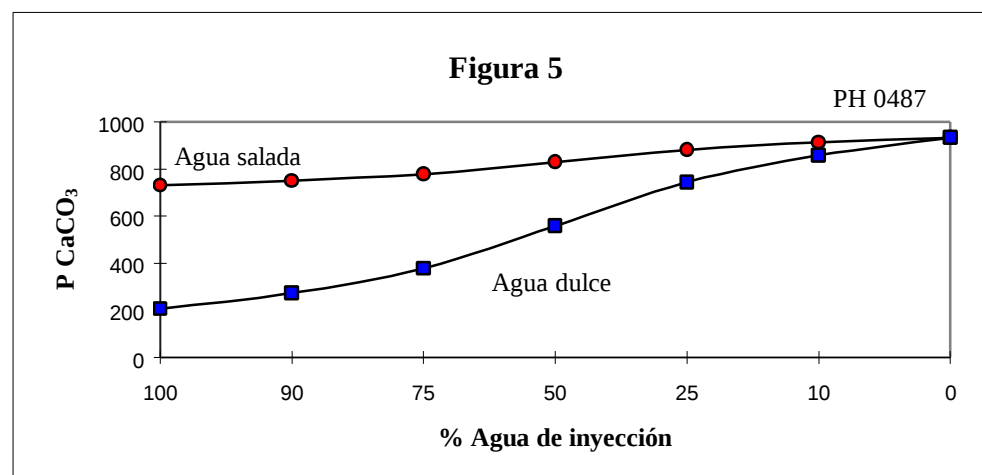
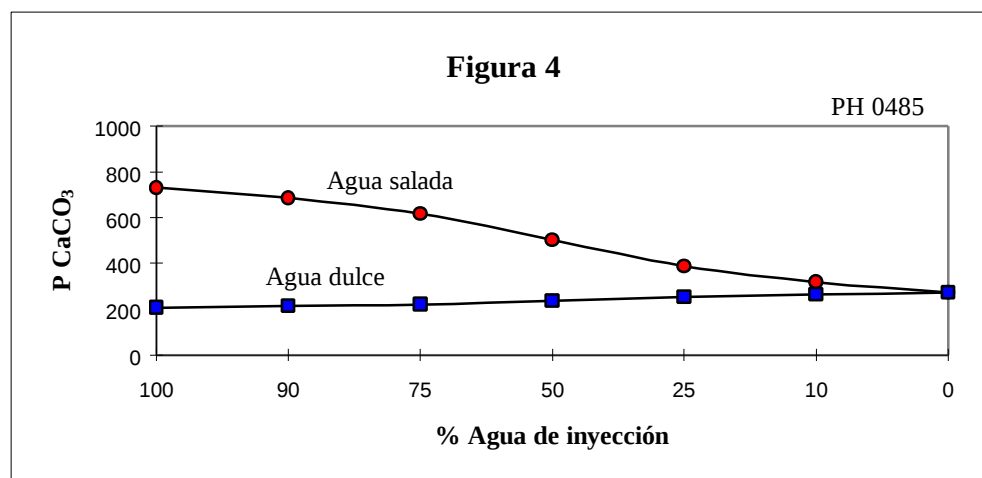
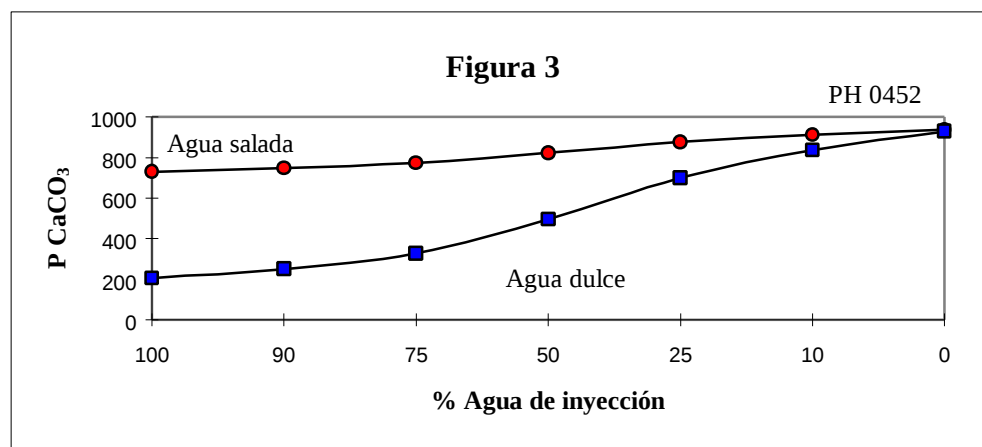
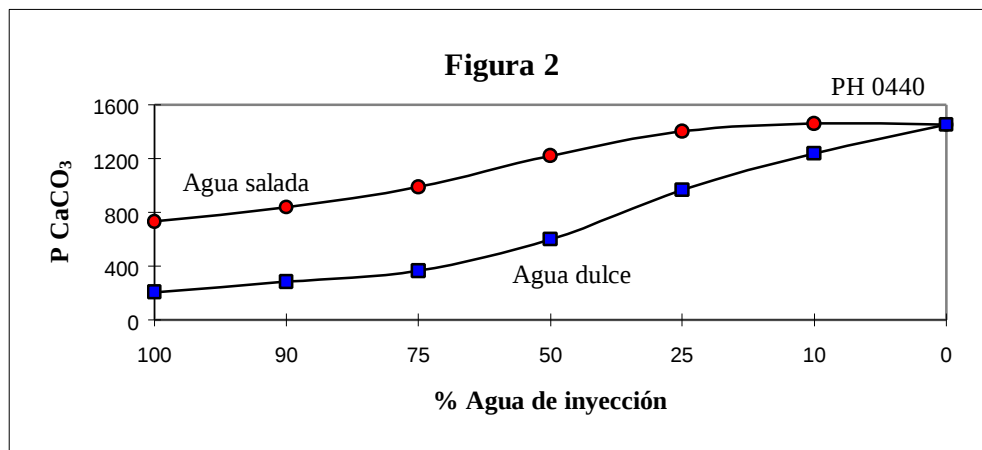
FIGURAS

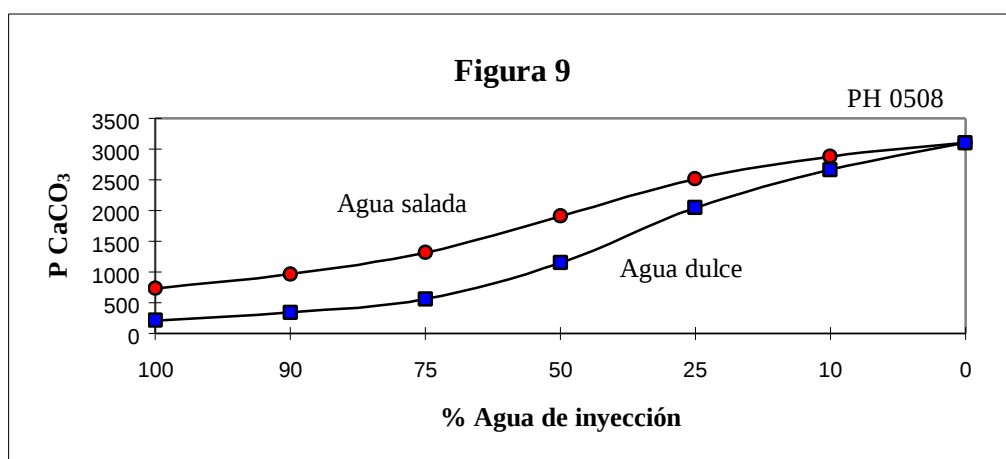
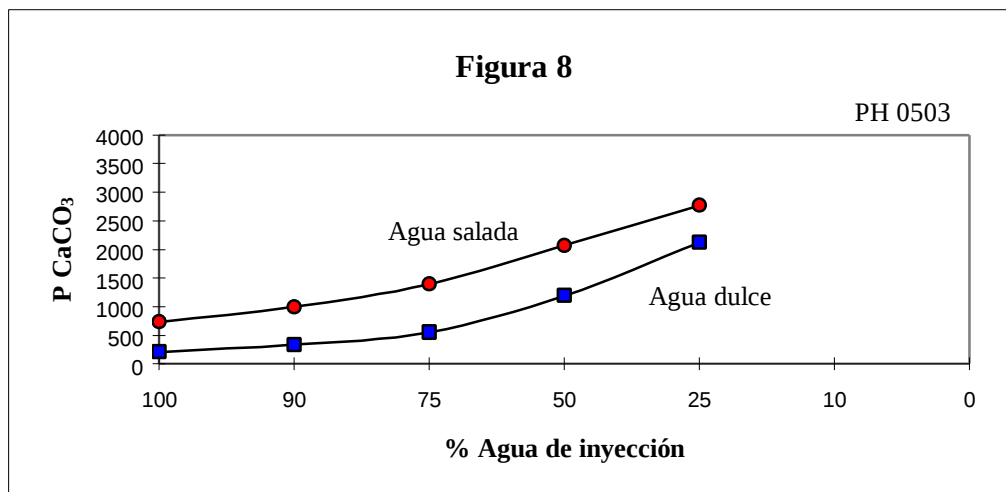
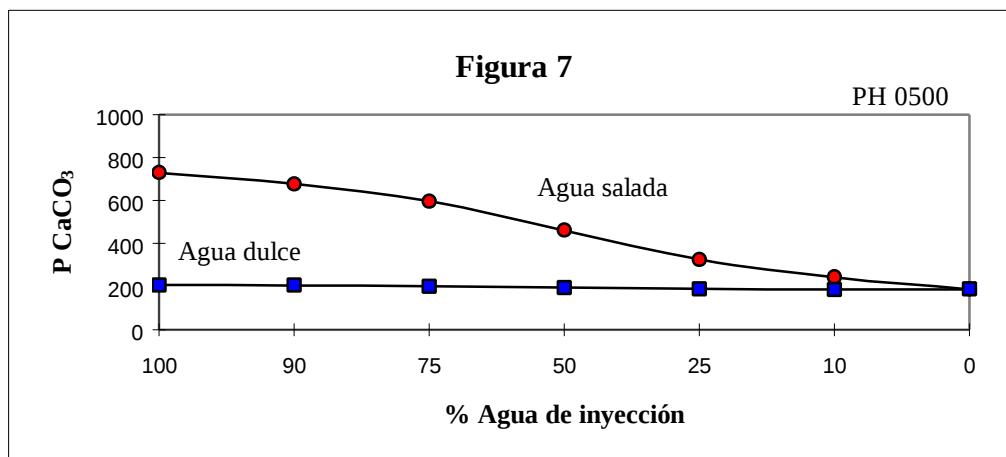
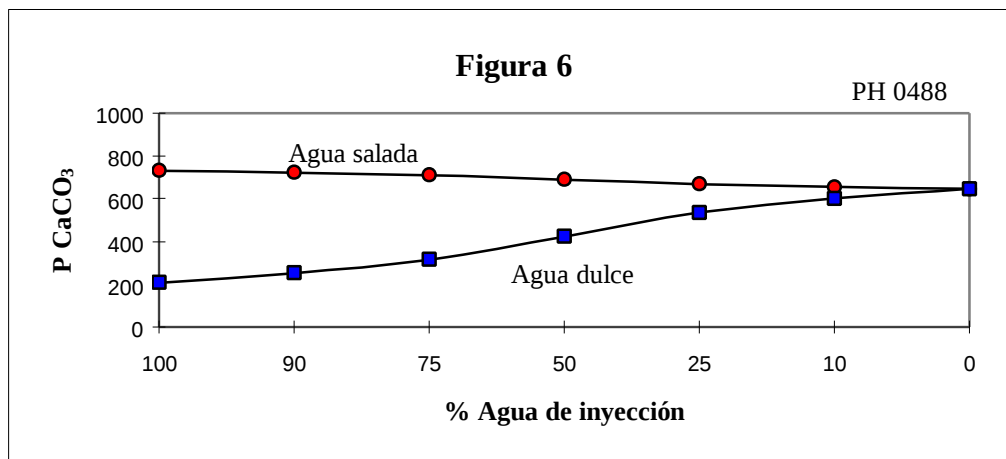
Figura 1: Piloto de inyección en capa H, batería 8

Referencias

Pozo inyector

Pozo productor
muestreado





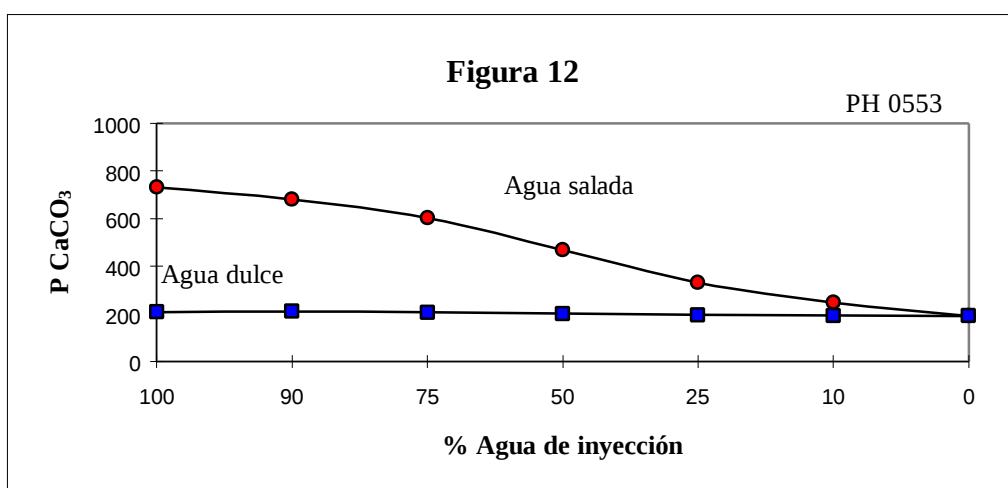
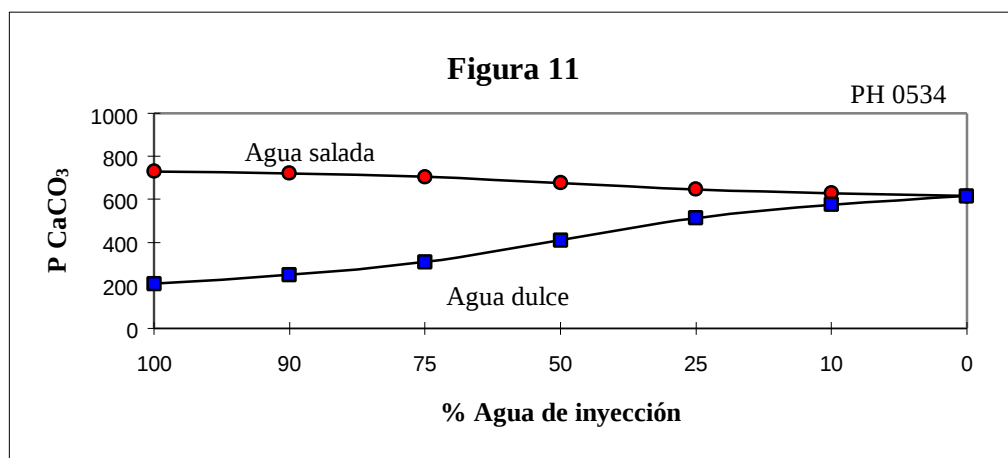
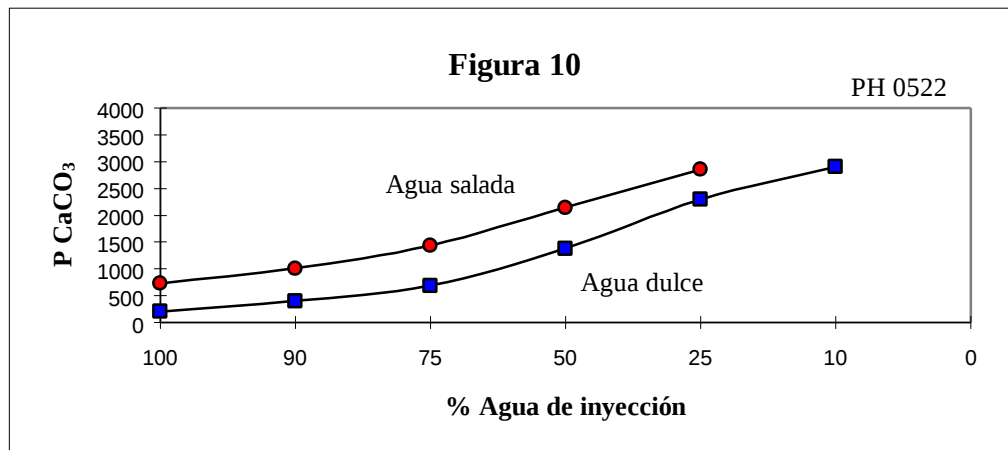


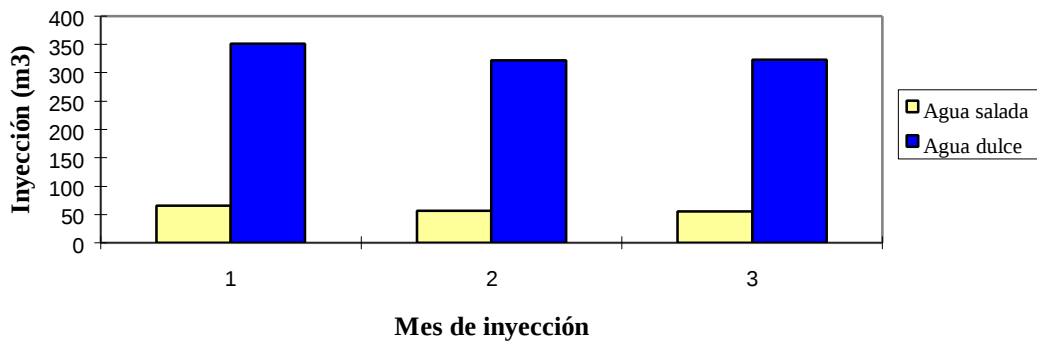
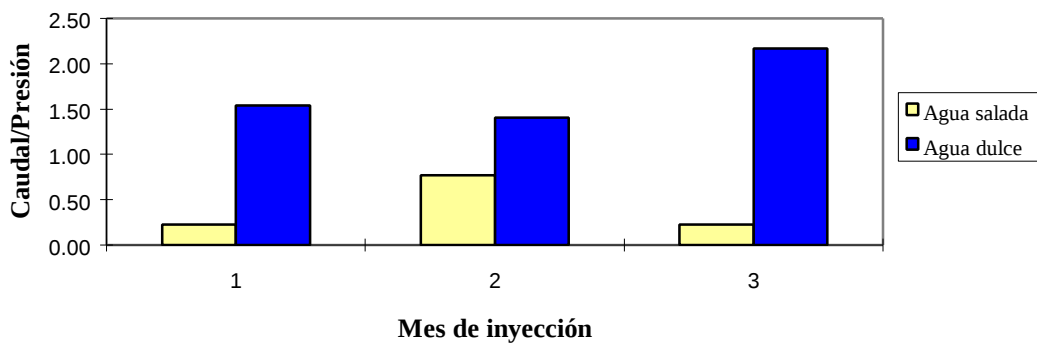
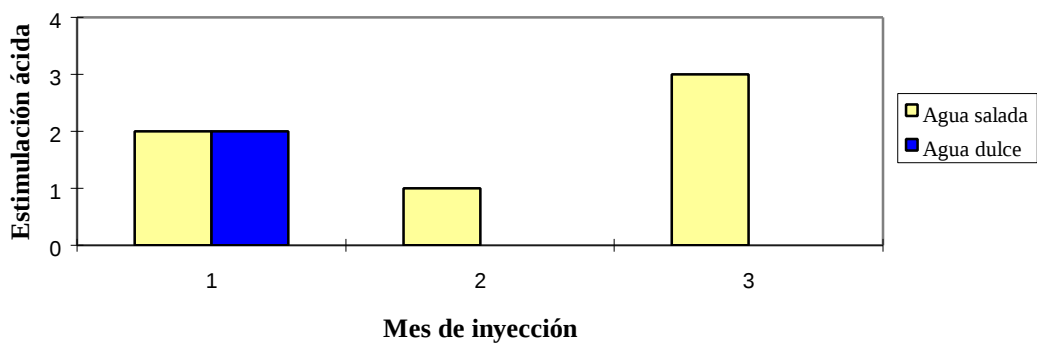
Figura 13**Figura 14****Figura 15**

Tabla 1

Punto de muestreo	PH 0440	PH 0452	PH 0485	PH 0487	PH 0488	PH 0500	PH 0503	PH 0508	PH 0522	PH 0534	PH 0 553	AGUA	AGUA
Capa productora	H,D	H,D,F	H	H	H	H,E	H	H	H	H	H,D	S	D
Temperatura, ° C	42	38.7	21.5		20.7	31	23		32	38	23.8	30.4	13.5
pH	6.62	6.95	7.45	7.4	7.4	7.44	6.53	6.4	6.67	7.6	7.43	7.19	8

GASES DISUELTOS

SH ₂ , mg/l	2.5	4.5	4.5	9.5	4.5	4	2	2.5	1	4	6.5	4.5	0.5
CO ₂ , mg/l	110	201	66	220	151.2	0	264	0	165	0	36.6	88	9.66

ANIONES

Cl ⁻ , mg/l	77990	86383	33677	52820	29110	48812.5	138255	113440	130166	58138	30487	32614	142
SO ₄ ⁼ , mg/l	1300	0	16250	7750	12500	25	6500	9000	4500	650	425	750	360
CO ₃ ⁼ , mg/l	0	0	0	0	0	166	0	0	0	166	0	0	
CO ₃ H ⁻ , mg/l	1694.4	3275.9	6110	4066	5422	7116.6	2033	2541.6	2146.2	7794	10336	4405	292

CATIONES

Na ⁺ , mg/l	50007.9	56082.4	31600	38741	26434	34304.4	90301	76602	84584.1	40449	23688.8	22466	248
Ca ⁺ , mg/l	802	401	115.9	385	267.3	80.2	1462.8	1363.6	1503.7	250	80.2	307.9	87
Mg ⁺ , mg/l	486	380	93.3	140	81	48.6	781	316	753.3	163	48.6	174.96	15
Fe, total, mg/l	12	0.46	2.5	1.08	0.3	1.23	4.5	1.08	2.13	2.1	9.25	S/D	0.1

Agua S: Agua salada

Agua D: Agua dulce

Tabla 2

Pozo Productor	Agua de invec. (%)	STIFF Y DAVIS						ODDO Y TOMSON			
		SR CaSO ₄ (*)		SI CaCO ₃		P Stiff y Davis		Is CaCO ₃		P Oddo y Tomson	
		Agua S	Agua D	Agua S	Agua D	Agua S	Agua D	Agua S	Agua D	Agua S	Agua D
PH 0440 Capas H,D	100	0.0	0.0	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.0	0.0	1.27	0.77	836.9	284.0	0.6	0.3	571.4	100.0
	75	0.0	0.0	1.17	0.53	988.6	363.4	0.5	0.0	542.9	-88.6
	50	0.0	0.0	1.05	0.53	1220.6	597.4	0.3	-0.1	351.4	-400.0
	25	0.0	0.0	0.96	0.67	1401.1	964.0	0.1	-0.1	-11.4	-565.7
	10	0.0	0.0	0.91	0.78	1459.1	1234.9	0.0	-0.1	-302.9	-568.6
	0	0.0	0.0	0.88	0.88	1448.6	1448.3	-0.1	-0.1	-522.9	-522.9
PH 0452 Capas H,D y F	100	0.0	0.0	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.0	0.0	1.31	0.95	748.3	250.6	0.6	0.5	528.6	151.4
	75	0.0	0.0	1.25	0.78	774.0	327.7	0.5	0.3	482.9	105.7
	50	0.0	0.0	1.23	0.81	823.4	495.7	0.4	0.2	397.1	51.4
	25	0.0	0.0	1.23	0.97	877.1	700.6	0.3	0.2	317.1	91.4
	10	0.0	0.0	1.26	1.12	912.0	836.9	0.3	0.2	271.4	171.4
	0	0.0	0.0	1.28	1.23	936.3	928.6	0.3	0.3	245.7	245.7
PH 0485 Capa H	100	0.0	0.0	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.1	0.1	1.36	1.39	685.4	213.4	0.7	0.9	520.0	185.7
	75	0.2	0.2	1.35	1.24	616.9	220.6	0.7	0.8	462.9	182.9
	50	0.2	0.2	1.34	1.21	502.9	236.6	0.6	0.6	368.6	177.1
	25	0.2	0.2	1.31	1.20	388.0	253.7	0.6	0.6	274.3	174.3
	10	0.2	0.2	1.29	1.22	319.4	264.9	0.6	0.5	217.1	177.1
	0	0.2	0.2	1.26	1.26	272.9	272.9	0.5	0.5	180.0	180.0
PH 0487 Capa H	100	0.0	0.0	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.1	0.1	1.38	1.33	750.3	273.1	0.7	0.9	568.6	225.7
	75	0.1	0.1	1.40	1.29	779.1	377.4	0.7	0.8	588.6	302.9
	50	0.2	0.1	1.46	1.36	829.7	558.3	0.7	0.7	628.6	434.3
	25	0.2	0.2	1.54	1.48	881.7	744.0	0.8	0.8	680.0	577.1
	10	0.3	0.3	1.60	1.57	913.4	857.7	0.8	0.8	717.1	674.3
	0	0.3	0.3	1.63	1.63	934.0	934.0	0.8	0.8	740.0	740.0
PH 0488 Capa H	100	0.0	0.0	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.1	0.1	1.38	1.50	722.6	251.7	0.7	1.0	554.3	220.0
	75	0.1	0.1	1.40	1.41	710.0	314.6	0.7	0.9	551.4	274.3
	50	0.2	0.2	1.45	1.43	689.1	423.4	0.8	0.9	548.6	360.0
	25	0.3	0.3	1.50	1.48	667.7	534.0	0.8	0.9	542.9	448.6
	10	0.4	0.4	1.54	1.53	655.1	600.9	0.8	0.9	540.0	502.9
	0	0.4	0.4	1.56	1.56	646.0	646.0	0.9	0.9	540.0	540.0
PH 0500 Capas H,E	100	0.0	0.0	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.0	0.0	1.37	1.45	677.7	206.6	0.7	1.0	514.3	180.0
	75	0.0	0.0	1.37	1.29	597.4	200.9	0.7	0.8	451.4	168.6
	50	0.0	0.0	1.36	1.20	461.7	194.9	0.7	0.6	340.0	145.7
	25	0.0	0.0	1.32	1.16	325.1	189.4	0.6	0.5	225.7	122.9
	10	0.0	0.0	1.27	1.15	242.6	186.9	0.5	0.5	154.3	114.3
	0	0.0	0.0	1.21	1.17	187.4	187.4	0.4	0.4	108.6	108.6
PH 0503 Capa H	100	0.0	0.0	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.1	0.1	1.30	0.66	991.4	338.9	0.6	0.2	668.6	54.3
	75	0.1	0.1	1.30	0.58	1391.1	547.4	0.5	-0.1	757.1	-225.7
	50	0.3	0.3	1.42	0.84	2069.1	1189.7	0.4	-0.1	828.6	-371.4
	25	0.5	0.5	1.71	1.34	2766.6	2120.3	0.4	0.1	914.3	71.4
	10	0.7	0.7					0.4	0.3	965.7	577.1
	0	0.9	0.9					0.4	0.4	985.7	985.7
PH 0508 Capa H	100	0.0	0.0	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.1	0.1	1.26	0.65	966.0	337.1	0.6	0.2	620.0	48.6
	75	0.2	0.2	1.20	0.57	1314.0	557.4	0.4	-0.1	628.6	-251.4
	50	0.4	0.3	1.25	0.74	1906.9	1150.0	0.3	-0.1	531.4	-531.4
	25	0.6	0.6	1.38	1.10	2511.1	2045.1	0.2	0.0	454.3	-285.7
	10	0.9	0.9	1.53	1.39	2877.4	2662.0	0.2	0.1	451.4	111.4
	0	1.0	1.0	1.65	1.65	3104.9	3104.9	0.2	0.2	462.9	462.9

Tabla 2 (Continuación)

Pozo Productor	Agua de inyec. (%)	STIFF Y DAVIS						ODDO Y TOMSON			
		SR CaSO ₄ (*)		SI CaCO ₃		P Stiff y Davis		Is CaCO ₃		P Oddo y Tomson	
		Agua S	Agua D	Agua S	Agua D	Agua S	Agua D	Agua S	Agua D	Agua S	Agua D
PH 0522 Capa H	100	0.0	0.0	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.1	0.1	1.36	0.85	1012.0	402.6	0.6	0.3	717.1	151.4
	75	0.1	0.1	1.40	0.79	1434.9	694.3	0.6	0.1	905.7	28.6
	50	0.2	0.2	1.53	1.03	2147.7	1381.1	0.5	0.1	1128.6	45.7
	25	0.4	0.4	1.75	1.47	2855.1	2295.1	0.5	0.3	1294.3	514.3
	10	0.5	0.5		1.86		2905.4	0.5	0.4	1357.1	991.4
	0	0.6	0.6					0.5	0.5	1371.4	1371.43
PH 0534 Capa H	100	0.0	0.0	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.0	0.0	1.40	1.53	720.9	248.6	0.7	1.0	557.1	222.9
	75	0.0	0.0	1.47	1.54	704.9	308.6	0.8	1.0	560.0	277.1
	50	0.0	0.0	1.60	1.66	676.9	410.3	0.8	1.0	562.9	365.7
	25	0.0	0.0	1.75	1.77	647.1	512.6	1.0	1.0	560.0	460.0
	10	0.0	0.0	1.86	1.87	628.6	574.6	1.0	1.1	560.0	517.1
	0	0.0	0.0	1.93	1.93	615.7	615.7	1.1	1.1	557.1	557.1
PH 0553 Capas H,D	100	0.0	0.0	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.0	0.0	1.40	1.68	680.3	210.3	0.7	1.2	534.3	194.3
	75	0.0	0.0	1.44	1.56	602.0	206.3	0.8	1.1	488.6	191.4
	50	0.0	0.0	1.48	1.43	467.4	200.3	0.8	0.9	388.6	177.1
	25	0.0	0.0	1.47	1.39	330.0	195.4	0.8	0.8	274.3	162.9
	10	0.0	0.0	1.42	1.35	246.9	192.3	0.8	0.8	200.0	157.1
	0	0.0	0.0	1.37	1.34	190.3	190.3	0.7	0.7	151.4	151.4
Resumen	Agua de inyec. (%)	SRCaSO ₄ (*)		SICaCO ₃		P Stiff y Davis		SICaCO ₃		P Oddo y Tomson	
		Agua S	Agua D	Agua S	Agua D	Agua S	Agua D	Agua S	Agua D	Agua S	Agua D
Valores promedio	100	0.00	0.00	1.36	1.57	730.6	206.9	0.7	1.0	557.1	177.1
	90	0.05	0.05	1.34	1.16	799.2	274.3	0.7	0.7	577.7	157.7
	75	0.07	0.07	1.34	1.05	901.2	374.4	0.6	0.5	583.6	87.8
	50	0.14	0.12	1.38	1.11	1072.3	621.6	0.6	0.4	552.2	41.3
	25	0.20	0.20	1.45	1.28	1241.0	959.5	0.5	0.5	502.3	161.0
	10	0.27	0.27	1.15	1.26	750.4	937.8	0.5	0.5	466.5	311.4
	0	0.31	0.31	1.16	1.15	757.8	757.1	0.5	0.5	438.2	438.2
Relación agua S / agua D		0.88		1.09		1.45		0.96		4.19	

(*) El valor SR=0 significa <<1

Cuando no se indica valor supera el rango de cálculo del prograr

Agua S: Agua salada Agua D: Agua dulce
