

PROYECTO CICYT, HID 1999-0205

Salinización Asociada a la Precipitación y a las Aguas Subterráneas en distintas
Áreas del Territorio Español Continental e Insular.

Ejecutor: IGME en coordinación con DIT/UPC

Investigador principal: Emilio Custodio (IGME/UPC)
Investigadores asociados: M^a. Del Pilar de la Fuente (IGME)
 Itziar Vázquez (IGME)
 Loreto Fernández (IGME)
 Luis Moreno Merino (IGME)

Becario: Francisco J. Alcalá (IGME/UPC)

Informe interno n^o 2

Título:
Efectos de las plantas de desalinización por ósmosis inversa en la relación Cl/Br

Fecha: Abril 2003

<i>Autores:</i>	<i>Principal:</i> Emilio Custodio	IGME
	<i>Asociados:</i> Francisco J. Alcalá	IGME

Resumen:

Se ha muestreado el agua de alimentación (agua salobre subterránea y agua marina), y la producción de agua dulce y salmera de rechazo de seis plantas de desalinización por osmosis inversa, en el W de Gran Canaria y en el Levante Mediterráneo español. Mediante la composición química de esos tres componentes de cada planta, que incluyen determinaciones de Cl y Br. Los balances iónicos tienen la incertidumbre de los errores analíticos aunque en conjunto se adaptan bien al fraccionamiento químico esperable, y el par Cl, Br lo hace bastante ajustadamente, lo que indica la bondad de las determinaciones realizadas. La relación Cl/Br varía poco para la salmera de rechazo, y es algo menor para el agua producto, pero sin cambios lo suficientemente grandes como para ser característicos.

ENSAYO DEL VALOR HIDROGEOLÓGICO DE LA RELACIÓN Cl/Br
Efectos de las plantas de desalinización por ósmosis inversa

Lugar de ensayo: DESALINIZADORAS (Gran Canaria y Murcia-Alicante)

Fecha de muestreo:

Desalinizadoras en Gran Canaria (La Aldea): abril-mayo 2001

Desalinizadoras en Murcia y Alicante: noviembre 2001

Muestreador (Gran Canaria): María del Carmen Cabrera (Univ. LPGC)

Muestreador (Murcia-Alicante): Javier Lambán (oficina del IGME en Murcia)

Interpretación: Emilio Custodio

Ejecución: Francisco Javier Alcalá

Fecha: octubre 2002

Organismos colaboradores: Univ. de las Palmas de Gran Canaria

Objetivos:

- Comprobar si la desalinización por osmosis inversa modifica la relación rCl/rBr de las aguas producto y rechazo respecto a las de origen.

Características del muestreo: Los conductos de entrada y salida de agua de las unidades de desalinización.

Las desalinizadoras de Gran Canaria que se han muestreado están en el Acuífero de La Aldea. Se trata de un barranco relleno de materiales aluviales (conglomerados) de 15-20 m de espesor medio, excavado sobre materiales volcánicos y vulcano-sedimentarios miocenos. Los pozos explotan agua del aluvial, aunque algunos llegan a los basaltos, extrayendo agua de ambos materiales. No se observa intrusión marina en el acuífero. Las desalinizadoras 1 y 2 explotan aguas del acuífero y la desalinizadora 3 agua de mar. Las aguas son cloruradas sódicas (Muñoz *et al.*, 1996).

Las desalinizadoras de Murcia se localizan en la Unidad Hidrogeológica del Campo de Cartagena (1500 km²). Los pozos de explotación de las plantas de osmosis inversa de Hondón de Los Frailes y de Torre Molina (2737-6-0064) captan agua del acuífero triásico de las Victorias, en mármoles, calizas y calcarenitas terciarias. La planta desalinizadora de Finca del Escobar (Alicante) se localiza en la Unidad de Crevillente (60 km²) y el pozo (2737-7-0038) explota los acuíferos calcáreos del Lías de la Sierra de Crevillente. El agua es clorurada-sódica (ITGE-DGOHCA, 1999).

Comprobaciones buscadas: se pretende caracterizar el valor de rCl/rBr para las aguas involucradas en el proceso de desalinización por osmosis inversa.

Tablas de resultados: en las Tablas 1, 2 se dan los resultados de los análisis químicos para las desalinizadoras de La Aldea (GC) y en las Tablas 3 y 4 los de las desalinizadoras de Murcia-Alicante.

Claves de tipos de aguas

Producto = agua producto

Aliment. = agua de alimentación (agua de pozo o agua del mar)

Rechazo = agua de rechazo de la planta

Determinaciones

- electrometría para conductividad eléctrica (CE) y pH
- ebullición ácida + valoración con MnO_4K para oxidabilidad
- espectrometría de emisión atómica para K, Na
- espectrometría de adsorción en autoanalizador de flujo continuo para NH_4 , CO_3H , Ca, Cl, PO_4 , Mg, NO_3 , NO_2 , SiO_2 , SO_4
- volumetría para CO_3
- cromatografía iónica HPLC para Cl, Br y en su caso para NO_3 , NO_2 y SO_4

El ión Cl se ha medido por espectrometría y por HPLC. El primer valor es más próximo al real. El segundo puede variar al tener diluciones importantes, pero ello no afecta a la relación rCl/rBr, que así es de mucha mayor fiabilidad. La diferencia entre ambas determinaciones (ver Tabla 5) es en general inferior al 20%, siendo más alto el valor espectrométrico.

Tabla 1.- Tabla de resultados: desalinizadoras de Gran Canaria

Desalinizadora	4826 Daniel (30-04-01)			Romertor (30-04-01)			Cadagua (08-05-01)			
	muestra	producto	aliment	rechazo	producto	aliment	rechazo	producto	aliment	rechazo
Ident. Lab. IGME	01/307-05	01/307-07	01/307-06	01/307-08	01/307-10	01/307-09	01/307-11	01/307-13	01/307-12	
Fecha de muestreo	30-abr-01	30-abr-01	30-abr-01	30-abr-01	30-abr-01	30-abr-01	08-may-01	08-may-01	08-may-01	
Na (mg/L)	29,5	804,2	1418,9	34,1	904,1	2571,1	202,2	11742,0	17399,0	
K (mg/L)	<1	16,1	39,9	1,01	20,5	68,2	7,1	470,5	774,5	
Ca (mg/L)	1	268	556	1	360	942	1	826	1040	
Mg (mg/L)	1	214	449	1	300	838	1	1550	1400	
NH_4 (mg/L)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
Cl (mg/L)	26	1486	2750	35	1892	5220	260	19102	29560	
Sr (mg/L)	<0,5	3,9	9,23	<0,5	3,59	9,84	<0,5	10,27	23,3	
CE (2)	146	6712	13742	189	8162	23483	885	65656	119611	
SO_4 (mg/L) (1)	1,54	688,64	1468,61	4,26	874,18	2561,94	6,06	2749,23	4252,9	
NO_3 (mg/L) (1)	10,51	131,6	242,17	12,54	214,97	523,57	<0,20	N.D.	N.D.	
NO_2 (mg/L) (1)	0,22	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	
Br (mg/L) (1)	0,108	3,93	10,51	0,143	6,303	17,457	1,12	74,115	118,518	
Cl (mg/L) (1)	22,3	1118	2341	35,1	1568	4528	242	18808	28280	
rCl/rBr (1)	465	640	501	552	560	584	486	571	537	

(1) HPCL

(2) Conductividad eléctrica a dilución infinita

Tabla 2.- Tabla de resultados: desalinizadoras de Gran Canaria. Valores en meq/L (r)

Desalinizadora	4826 Daniel (30-04-01)			Romertor (30-04-01)			Cadagua (08-05-01)		
	muestra	producto	aliment	rechazo	producto	aliment	rechazo	producto	aliment
Ident. Lab. IGME	01/307-05	01/307-07	01/307-06	01/307-08	01/307-10	01/307-09	01/307-11	01/307-13	01/307-12
rCl	0,63	31,49	65,94	0,99	44,17	127,55	6,82	529,80	796,62
rSO ₄	0,03	14,35	30,60	0,09	18,21	53,37	0,13	57,28	88,60
rHCO ₃									
rCO ₃									
rNO ₃	0,17	2,12	3,91	0,20	3,47	8,44	0,00		
rNO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
rBr	0,00	0,05	0,13	0,00	0,08	0,22	0,01	0,93	1,48
rΣa	0,83	48,01	100,58	1,28	65,93	189,59	6,96	588,01	886,71
rNa	1,28	34,97	61,69	1,48	39,31	111,79	8,79	510,52	756,48
rK	<0,02	0,41	1,02	0,03	0,52	1,74	0,18	12,03	19,81
rCa	0,05	13,40	27,80	0,05	18,00	47,10	0,05	41,30	52,00
rMg	0,08	17,69	37,11	0,08	24,79	69,26	0,08	128,10	115,70
rNH ₄	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
rSr	0,01	0,05	0,11	<0,01	0,04	0,11	<0,01	0,12	0,27
rΣc	1,43	66,51	127,73	1,64	82,67	230,00	9,11	692,07	944,26
ε	0,53	0,32	0,24	0,25	0,23	0,19	0,27	0,16	0,06
rNa/rK	>26	84,92	60,45	57,40	74,97	64,09	48,41	42,43	38,19
rSO ₄ /rCl	0,05	0,46	0,46	0,09	0,41	0,42	0,02	0,11	0,11
rMg/rCl	0,13	0,56	0,56	0,08	0,56	0,54	0,01	0,24	0,15
rMg/rCa	1,65	1,32	1,33	1,65	1,38	1,47	1,65	3,10	2,23

$$\varepsilon = \text{error} = 2(\Sigma a - \Sigma c) / (\Sigma a + \Sigma c)$$

Tabla 3.- Tabla de resultados: desalinizadoras de Murcia y Alicante

Desalinizadora	Hondón de los Frailes (MU) 26-10-01			2737 Torre Molina (MU) 06-11-01			2737-7-0038 Finca del Escobar (A) 06-11-01		
	muestra	producto	rechazo	aliment	producto	rechazo	aliment	producto	rechazo
Ident. Lab. IGME	01/307-01	01/307-02	01/307-03	01/307-04	01/307-05	01/307-06	01/307-07	01/307-08	01/307-09
Fecha de muestreo	26-oct-01	26-oct-01	26-oct-01	06-nov-01	07-nov-01	08-nov-01	06-nov-01	07-nov-01	08-nov-01
Na (mg/L)	47	401	939	1035	3425	56	1147	3928	144
K (mg/L)	<1	7	11	28	101	3	28	115	4
Ca (mg/L)	6	200	362	282	814	6	260	1046	7
Mg (mg/L)	6	75	114	162	618	6	236	817	5
NH ₄ (mg/L)	<0,05	0,12	<0,05	<0,05	0,07	0,61	<0,05	<0,05	0,2
Cl (mg/L)	82	712	1390	1390	4280	75	1680	5800	192
SO ₄ (mg/L)	4	560	1010	1060	4080	18	1340	4800	9
HCO ₃ (mg/L)	22	173	316	500	1450	60	306	868	80
CO ₃ (mg/L)	0	0	14	0	0	0	0	0	0
NO ₃ (mg/L)	3	8	13	6	22	<0,5	6	20	<0,5
NO ₂ (mg/L)	<0,05	<0,05	<0,05	13	46	<0,05	<0,05	0,6	<0,05
PO ₄ (mg/L)	<0,05	<0,05	0,16	<0,05	0,06	<0,05	0,1	0,07	<0,05
SiO ₂ (mg/L)	3	15,7	26	20,9	79,2	0,9	25,4	105,6	2,9
Oxidabilidad KMnO ₄ (mg/L)	0,3	1,1	1,8	8,1	23,4	0,4	4,6	12,5	0,8
CE (2)	244	3333	5803	6493	20825	304	7553	27305	658
pH	7,5	7,8	8,5	8	7,7	8,1	7,8	8	8,1
Br (mg/L) (1)	0,077	0,587	1,084	3,149	10,412	0,208	4,250	15,868	0,319
Cl (mg/L) (1)	65,2	601	1067	1235	3474	59,4	1242	4624	165,7
rCl/rBr	1905	2304	2215	882	751	643	658	656	1169

(1) HPCL

(2) Conductividad eléctrica a dilución infinita

Tabla 4.- Tabla de resultados: desalinizadoras de Murcia y Alicante. Valores en meq/L (r)

Desalinizadora	Hondón de los Frailes (MU) 26-10-			2737 Torre Molina (MU) 06-11-01			2737-7-0038 Finca del Escobar (A)		
muestra	producto	aliment	rechazo	producto	aliment	rechazo	producto	aliment	rechazo
Ident. Lab. IGME	01/307-01	01/307-02	01/307-03	01/307-06	01/307-04	01/307-05	01/307-09	01/307-07	01/307-08
rCl	2,31	20,06	39,15	2,11	39,15	120,56	5,41	47,32	163,38
rSO ₄	0,08	11,67	21,04	0,38	22,08	85,00	0,19	27,92	100,00
rHCO ₃	0,36	2,84	5,18	0,98	8,20	23,77	1,31	5,02	14,23
rCO ₃	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
rNO ₃	0,05	0,13	0,21	0,00	0,10	0,35	0,00	0,10	0,32
rNO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,96	0,00	0,00	0,01
rBr	0,00	0,01	0,01	0,00	0,04	0,13	0,00	0,05	0,20
rΣa	2,80	34,70	65,83	3,47	69,84	230,78	6,91	80,41	278,14
rNa	2,04	17,43	40,83	2,43	45,00	148,91	6,26	49,87	170,78
rK	0,00	0,18	0,28	0,08	0,72	2,58	0,10	0,72	2,94
rCa	0,30	10,00	18,10	0,30	14,10	40,70	0,35	13,00	52,30
rMg	0,50	6,20	9,42	0,50	13,39	51,07	0,41	19,50	67,52
rNH ₄	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
rΣc	2,84	33,82	68,63	3,34	73,20	243,27	7,14	83,09	293,55
ε	0,01	-0,03	0,04	-0,04	0,05	0,05	0,03	0,03	0,05
rNa/rK	-	97,39	145,12	31,73	62,84	57,65	61,20	69,64	58,07
rSO ₄ /rCl	0,04	0,58	0,54	0,18	0,56	0,71	0,03	0,59	0,61
rMg/rCl	0,21	0,31	0,24	0,23	0,34	0,42	0,08	0,41	0,41
rMg/rCa	1,65	0,62	0,52	1,65	0,95	1,25	1,18	1,50	1,29

$$\varepsilon = \text{error} = 2(\Sigma a - \Sigma c) / (\Sigma a + \Sigma c)$$

Tabla 5.- Diferencia relativa entre las dos determinaciones de cloruros

Desalinizadoras de La Aldea (GC)

Cl mg/L, espectrométrico (e)	26	35	260	1486	1892	19102	2750	5220	29560
Cl mg/L, HPLC	22,3	35,1	242	1118	1568	18808	2341	4528	28280
ΔCl	3,7	-0,1	18	268	324	294	209	692	1280
ΔCl/Cl(e)(x10 ⁻²)	14	0	7	18	17	2	8	13	4

Desalinizadoras de Murcia-Alicante

Cl mg/L, espectrométrico (e)	82	75	192	712	1390	1680	1390	4280	5800
Cl mg/L, HPLC	65,2	59,4	165,7	601	1235	1242	1067	3474	4624
ΔCl	16,8	15,6	26,3	111	55	438	323	806	1176
ΔCl/Cl(e)(x10 ⁻²)	20	21	14	16	4	26	26	19	20

Fig. 1.- Relación rCl/rBr versus Cl en Desalinizadoras de Gran Canaria

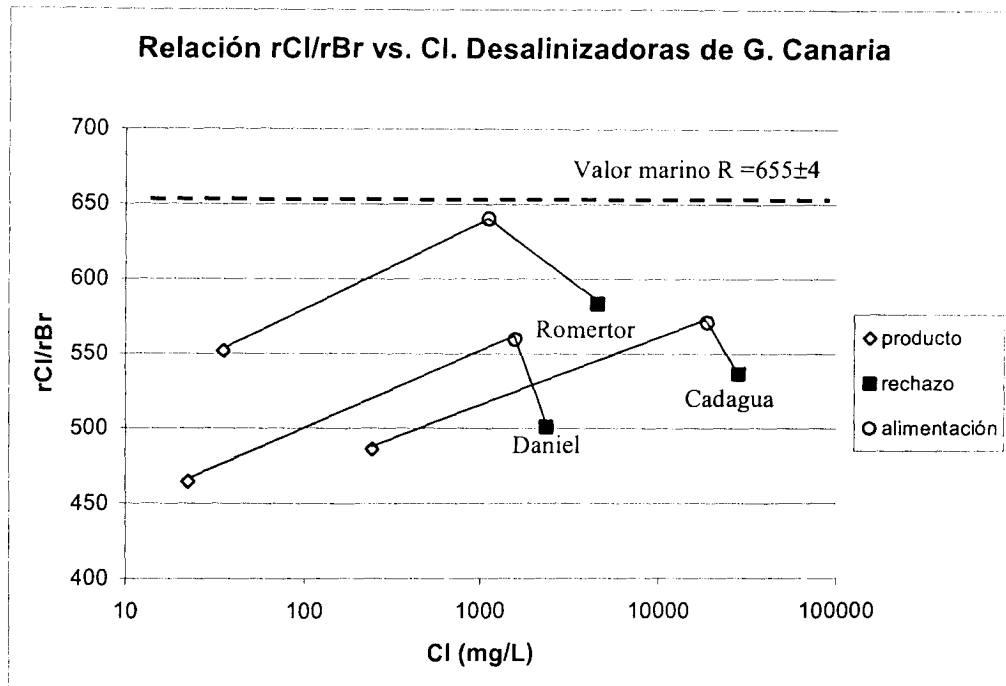
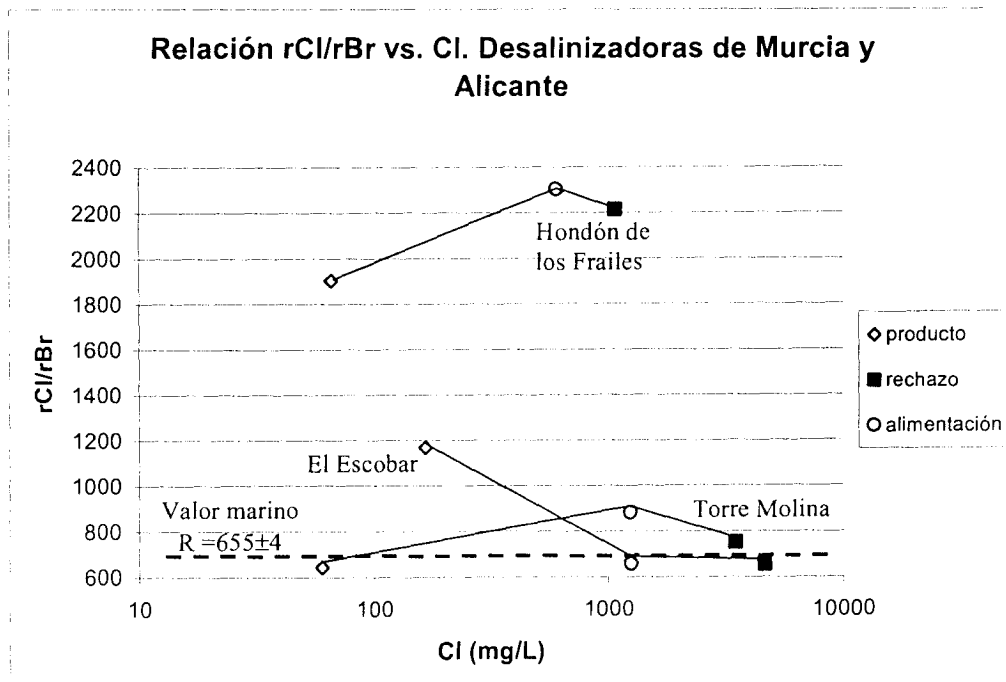


Fig. 2.- Relación rCl/rBr versus Cl en Desalinizadoras de Murcia y Alicante



Resultados:

Se han estudiado muestras tomadas de las instalaciones de desalinización por osmosis inversa en los conductos de entrada de agua bruta (alimentación) y de salida de agua producto y rechazo en las desalinizadoras descritas (Fig. 1 y 2). Comúnmente existe un pretratamiento del agua de alimentación a las desalinizadoras de osmosis inversa para desinfección, corrección de pH, filtración-clarificación, control de incrustaciones y eliminación final del cloro residual.

Dado que se trata en todos los casos de agua subterránea o en un caso de agua del mar filtrada, cabe expresar que los requisitos de pretratamiento sean pequeños. En realidad este dato no se ha tomado en el muestreo.

En las desalinizadoras de La Aldea (GC) no se ha medido el pH ni se conoce el posible pretatamiento, pero parece que en todo caso se limita a una buena filtración. El hecho de que no se produzca ni NH_4 ni NO_2 apoya esta idea.

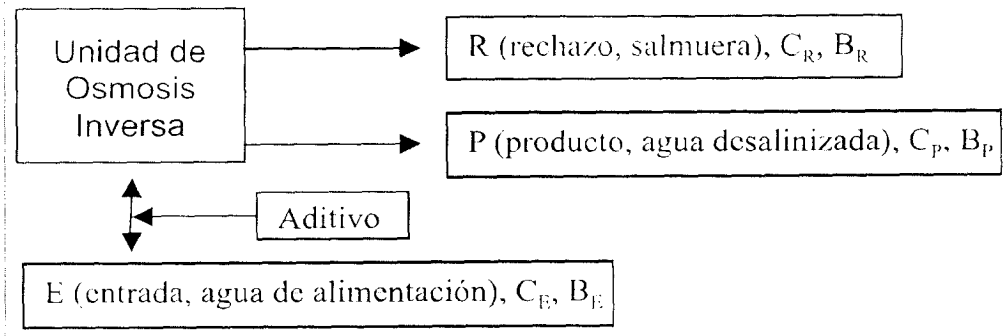
En las desalinizadoras de Murcia-Alicante el pH es relativamente alto con alcalinidad del agua de alimentación entre 3 y 16 meq/L, lo que supondría como mucho la aplicación de < 1 a 5 meq/L de acidez o sea < 35 a 180 mg/L de Cl si se acidifica con ClH (el Cl varía hasta un 20%) o 100-500 mg/L de SO_4 si se acidifica con SO_4H_2 (el SO_4 puede variar significativamente). El hecho de la generación de NH_4 y NO_2 en aguas inicialmente con solo NO_2 indica también la existencia de procesos adicionales que no se aportan con la descripción del muestreo.

Para el tratamiento se supondrá que los aditivos no afectan al balance de masas entre alimentación, producto y rechazo. Para el caso del balance de nitrógeno se consideran todas las especies disueltas, expresada como NO_3 , y en el caso del balance de carbono se consideran los carbonatos más los bicarbonatos expresados como bicarbonatos.

Discusión:

Se ha comprobado que existe cierto fraccionamiento de la relación $R = r\text{Cl}/r\text{Br}$ en el proceso osmótico, haciendo variar el valor de R entre las aguas bruta, producto (consumo) y de rechazo (salmueras). Se ha realizado un balance de Cl y Br en las unidades de desalinización por osmosis inversa (Fig. 3).

Figura 3.- Esquema del funcionamiento de una unidad de ósmosis inversa



E, P y R corresponden a los caudales másicos de entrada, producto y rechazo
C y B son las concentraciones másicas de Cl y Br; es $C_R > C_E > C_P$ y $B_R > B_E > B_P$
Balance de masas (suponiendo que se puedan despreciar los aditivos):

$$\text{de agua, } E = P + R \quad (1)$$

$$\text{de bromuro, } E \cdot B_E = P \cdot B_P + R \cdot B_R \quad (2)$$

$$\text{de cloruro, } E \cdot C_E = P \cdot C_P + R \cdot C_R \quad (3)$$

Poniendo $P/E = X$, fracción de producto, y $R/E = 1-X$, fracción de rechazo, queda:

$$B_E = B_P X + B_R (1-X) \quad C_E = C_P X + C_R (1-X)$$

con lo que:

$$X = \frac{C_R - C_E}{C_R - C_P} = \frac{B_R - B_E}{B_R - B_P} \quad (4)$$

Los errores de medida de C y B hacen que ambos valores de X no sean del todo iguales. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 6.

Tabla 6.- Valores de cloruro (C) y bromuro (B) en mg/L y R=C/B relación ponderal ($R^* = \text{relación molar} = rCl/rBr$); P, E y R = producto, entrada y rechazo

Desalinizadora	C_P	B_P	R_P	R_P^*	C_E	B_E	R_E	R_E^*	C_R	B_R	R_R	R_R^*
Daniel, GC	22,3	0,108	206	465	1118	3930	284	641	2341	10,510	223	502
(1)	26				1486				2750			
Romertor, GC	35,1	0,143	245	553	1568	6,303	249	561	4528	17,457	259	585
(1)	35				1892				5220			
Cadagua, GC	242	1,120	216	487	18808	74,115	254	572	28280	118,518	239	538
(1)	260				19102				29560			
Hondón de los Frailes	65,2	0,077	847	1905	601	0,587	1024	2307	1067	1,084	984	2219
(1)	82				712				1390			
Torre Molina	59,4	0,208	262	643	1235	3,149	392	884	3474	10,412	337	752
(1)	75				1390				4280			
Finca del Escobar	165,7	0,319	519	1170	1242	4,250	292	659	4624	15,868	291	657
(1)	192				16580				5800			

(1) Valor espectrométrico. Los otros son cromatográficos HPLC.

Con estos valores se calcula en la Tabla 7 la fracción de producto X y la diferencia ε entre los pares de valores tomando el Cl y el Br de la Tabla 6 (pares C_p y B_p ; $C_p(1)$ y B_p).

Tabla 7.- Fracción de producto X y cálculo con C y B (Tabla 4). $\varepsilon = 2(X_C - X_B)/(X_C + X_B)$. \bar{X} es el valor de X adoptado en los cálculos siguientes

Desalinizadora	X_C	X_B	ε	\bar{X}
Daniel, GC	0,5275	0,6326	-0,1820	0,55
(1)	0,4640		-0,3075	
Romertor, GC	0,6586	0,6442	-0,0215	0,65
(1)	0,6419		-0,0036	
Cadagua, GC	0,3378	0,3781	-0,1139	0,35
(1)	0,3569		-0,0285	
Hondón de los Frailes	0,4652	0,4935	-0,1354	0,48
(1)	0,5183		-0,0495	
Torre Molina	0,6557	0,7118	-0,0820	0,68
(1)	0,6873		-0,0350	
Finca del Escobar	0,7586	0,7472	-0,0152	0,74
(1)	0,7347		-0,0169	

(1) con el dato de Cl espectrométrico

Los errores pueden ser a veces relativamente grandes y de un signo u otro, lo que indica que no hay una tendencia según que el cálculo se haga a partir del Cl o del Br. El par Cl y Br medido con HPLC, con cierto error por causa de la gran dilución, pero en igual proporción, tiende a dar sin embargo errores mayores que el par Cl-espectrométrico y Br. No se ha encontrado una explicación satisfactoria.

Para determinar el error estadístico de X, suponiendo distribuciones normales, la ecuación (4) se escribe

$$X = \frac{R-E}{R-P} \quad (5)$$

tanto para los cloruros (C) como para los bromuros (B).

Las variables son P, E, R

$$\sigma_X^2 = \sum_{P,E,R} \left(\frac{\partial X}{\partial i} \right)^2 \sigma_i^2 \quad (6)$$

o bien, en términos de los coeficientes de variación $CV_i = \sigma_i/i$

$$CV_X^2 = \frac{1}{X^2} \left[P^2 \left(\frac{R-E}{(R-P)^2} \right)^2 CV_P^2 + E^2 \left(\frac{1}{(R-P)^2} \right)^2 CV_E^2 + R^2 \left(\frac{E-P}{(R-P)^2} \right)^2 CV_R^2 \right] \quad (7)$$

Si $CV_P = CV_E = CV_R = CV_i$, lo que es razonable dado que domina el error por dilución, resulta:

$$\frac{CV_X}{CV_i} = \frac{\sqrt{P^2(R-E)^2 + E^2 + R^2(E-P)^2}}{X(R-P)^2} \quad (8)$$

Los resultados se indican en la Tabla 8:

Tabla 8.- Relación entre el coeficiente de variación de CVx (fracción de mezcla) y el coeficiente de variación analítico adoptado para los iones individuales, CVi, calculados para el cloruro (C) y el bromuro (B)

Desalinizadora	CV _x /CV _i (de C)	CV _x /CV _i (de B)
Daniel, GC	0,74	0,67
Romertor, GC	0,55	0,51
Cadagua, GC	0,80	0,90
Hondón de los Frailes	0,99	1,61
Torre Molina	0,46	0,42
Finca del Escobar	0,37	0,35

Los resultados de la Tabla 8 quieren decir que si los valores de R tienen un error expresado como un coeficiente de variación menor que 0,04, como se ha determinado en el estudio de errores químicos (Informe 1), el CV de X es similar. Sin embargo se observan algunos valores mayores. Se puede atribuir al efecto de errores en la dilución que, aunque no afecta a relación R, sí afecta a la comparación entre P, E y R, ya que cada muestra ha sido objeto de su propia manipulación.

Para determinar como varia R en función de C, de (4) se tiene:

$$B_P = - \frac{B_R(1-\bar{X}) - B_E}{\bar{X}} \quad (9)$$

En la que \bar{X} representa un valor medio de \bar{X} entre los dos calculados.

Dividiendo por C_p e introduciendo las relaciones R (ponderales):

$$\frac{B_p}{C_p} = \frac{1}{R_p} = \frac{\frac{B_R(1-\bar{X})}{C_p} - \frac{B_E}{C_p}}{\bar{X}} = \frac{\frac{C_R(1-\bar{X})}{C_p}}{\bar{X}} \frac{1}{R_R} + \frac{\frac{C_E}{C_p}}{\bar{X}} \frac{1}{R_E} \quad (10)$$

o multiplicando por R_E

$$\frac{R_E}{R_p} = -\frac{C_R}{C_p} \frac{1-\bar{X}}{\bar{X}} \frac{R_E}{R_R} + \frac{C_E}{C_p} \frac{1}{\bar{X}} \quad (11)$$

La ecuación (11) vale para cualquier ión conservativo en relación al cloruro.

Representando $\frac{R_E}{R_p}$ en función de $\frac{R_E}{R_R}$ para diferentes iones conservativos se

debe obtener una recta de pendiente $M = -\frac{C_R}{C_p} \frac{1-\bar{X}}{\bar{X}}$ y ordenada en el origen

$N = \frac{C_E}{C_p} \frac{1}{\bar{X}}$, en la que los diferentes puntos representados expresan las

diferencias de rechazo relativo de la membrana osmótica para cada ión considerado. Las desviaciones reales de los puntos representativos respecto de la recta son debidas a las imprecisiones analíticas, que tienen un gran peso

al ser $\frac{R_E}{R_p}$ el resultado de las diferencias de dos números uno o dos órdenes de

magnitud mayores, y el posible efecto de aditivos de pretratamiento.

Considerando que según la ecuación (4) es $C_R(1-\bar{X}) = C_E - C_p\bar{X}$, resulta $N = -M+1$.

La recta antes definida solo tiene sentido para valores de las R no negativos, es decir en el primer cuadrante.

Para $R_R \rightarrow \infty$ ($1/R_R \rightarrow 0$), es decir cuando todo el Br pasa al producto, es

$$R_p \geq \frac{C_p}{C_E} \bar{X} R_E$$

Para $R_p \rightarrow \infty$ ($1/R_p \rightarrow 0$), es decir cuando todo el Br se queda en el rechazo, es

$$R_R \geq \frac{C_R}{C_E} \bar{X} R_E$$

Estos mismos valores pueden obtenerse por balance directo suponiendo que el Br se va preferentemente (totalmente) a una u otra salida. Los resultados se expresan gráficamente en la Tabla 9.

Tabla 9.- Valores mínimos posibles para R_p y R_R para los valores de \bar{X} calculados

Desalinizadora	R_E	\bar{X}	R_p min	R_R min
Daniel, GC	284	0,55	3,1	327
Romertor, GC	249	0,65	3,6	467
Cadagua, GC	254	0,35	1,1	134
Hondón de los Frailes	1024	0,48	53	873
Torre Molina	392	0,68	13	750
Finca del Escobar	292	0,74	29	804

Es evidente que si no hay fraccionamiento del Br respecto al Cl es $R_E=R_P=R_R$. Para las condiciones de fraccionamiento de las unidades de osmosis inversa consideradas (valores de C_E , C_P , C_R y \bar{X}) resultan los valores de la Tabla 10:

Tabla 10.- Valores de la pendiente M y de la ordenada en el origen (N) de la ecuación (11). El valor J es la abscisa en el origen ($J = -N/M$)

Desalinizadora	C_E/C_P (1)	\bar{X}	N	-M	J
Daniel, GC	57,2	0,55	104	103	1,01
Romertor, GC	54,1	0,65	83	82	1,01
Cadagua, GC	73,5	0,35	210	209	1,00
Hondón de los Frailes	8,7	0,48	18	17	1,06
Torre Molina	18,6	0,68	27	26	1,04
Finca del Escobar	8,7	0,74	12	11	1,09

(1) datos espectrométricos

Comportamiento conjunto de los iones

Lo expuesto para el par Cl-Br vale también para cualquier otro par de especies disueltas. La Tabla 11 aporta las relaciones R_E/R_P y R_E/R_R para las desalinizadoras de La Aldea (Gran Canaria) y la Tabla 12 las relaciones obtenidas para las desalinizadoras de Murcia y Alicante. Con esos datos se puede preparar la Figura 4 para las desalinizadoras de Gran Canaria y la Figura 5 para las desalinizadoras de Murcia-Alicante, donde se muestran las relaciones R_E/R_P vs. R_E/R_R .

Comportamiento de los iones

El comportamiento general de los diferentes iones es ya conocido en la tecnología de membranas.

No parece sencillo diferenciar químicamente una salmuera de rechazo de la natural si no es por las concentraciones iónicas, mientras que el agua producto si se puede llegar a identificar respecto a otras aguas dulces por el bajo contenido relativo de SO_4 y Mg, y el ablandamiento. En la Tabla 13 se aportan algunos comentarios generales.

Las Tablas 14 y 15 aportan, respectivamente, los valores iónicos para las desalinizadoras de La Aldea (Gran Canaria) y desalinizadoras de Murcia y Alicante.

Tabla 11.- Relaciones R_E/R_P y R_E/R_R para las desalinizadoras de La Aldea (Gran Canaria), relativos al cloruro

Desalinizadora	4				3			2			R^S	R^H	R^N	R^O	R^M	R^C	R^A	R^S
	C	S	H	N	n	m	c	k	s									
Daniel P	26	1,5		11	30	1	1	<1			17,3		2,4	2,7	26	26	>26	
E	1486	689		132	804	214	268	16			2,2		11,3	6,1	6,9	5,5	93	
R	3750	1469		242	1419	449	556	40			1,9		11,4	5,9	6,1	4,9	69	
Romertor P	325	4		13	34	1	1	1			8,7		2,7	1	4	4	4	
E	1892	874		215	904	300	360	20			2,2		9	2,5	6,4	5,3	96	
R	5220	2562		524	2571	838	942	68			2,1		13,7	2,8	8,6	7,6	114	
Cadagua P	260	6		0	202	1	1	7			4,3		--	1,3	260	260	37	
E	19102	2749		0	11742	1550	826	470			6,9		--	1,6	12,3	23,1	41	
R	29560	4253		0	17399	1400	1040	774			6,8		--	1,7	21,1	28,4	38	
Br (B)																		
Daniel RE/RP		0,02		4,71	2,26	0,27	0,21	<3,6			1,38							
RE/RR		1,16		0,99	1,03	1,13	1,12	1,35			1,27							
Romertor RE/RP		0,25		3,33	2,5	1,6	1,32	24			1,02							
RE/RR		1,05		0,66	0,89	0,74	0,7	0,84			0,96							
Cadagua RE/RP		1,6		--	1,23	0,05	0,09	1,11			1,18							
RE/RR		1,01		--	0,94	0,58	0,81	1,08			1,06							

Tabla 12.- Relaciones R_E/R_P y R_E/R_R para las desalinizadoras de Murcia y Alicante, relativas al cloruro. Los valores entre paréntesis de la columna NO_3 son la acumulación de NH_4 y NO_2 transformados

Desalinizadora	4				3			2			R^S	R^H	R^N	R^O	R^M	R^C	R^A	R^I
	C	S	H	N	n	m	c	k	s									
Hondón de los Frailes P	82	4	22	3	47	6	6	<1	3		20,5	3,7	27,3	1,74	13,6	13,6	41	27,3
E	712	560	173	8	401	75	200	7	16		1,27	4,1	89	1,78	9,5	3,6	187	44,5
R	1390	1010	-330	13	939	114	362	11	26		1,4	4,2	107	1,48	12,2	3,8	126	53,5
Torre Molina P	75	18	60	(-2)	56	6	6	3	0,9		4,2	1,2	(-38)	1,3	12,5	12,5	25,0	23,3
E	1390	1060	500	(-13)	1035	162	282	28	21		1,3	2,8	(-82)	1,3	8,6	4,9	49,6	66,2
R	4280	4080	1450	(-84)	3425	618	814	101	80		1	2,9	(-51)	1,2	6,9	5,2	42,4	53,5
Finca del Escobar P	192	9	80	(-1)	144	5	7	4	3		21,3	2,4	(-192)	1,3	38,4	27,4	48,0	64,0
E	1680	1340	306	6	1147	236	260	28	25		1,3	5,5	280	1,5	7,1	6,5	60,0	67,2
R	5800	4800	868	21	3928	817	1046	115	106		1,2	6,7	276	1,5	7,1	5,5	50,4	54,7
Br (B)																		
Hondon de los Frailes RE/RP		0,06	1,11	3,26	1,02	0,7	0,26	-2,5	1,63		1,21							
RE/RR		0,91	0,98	0,83	1,2	0,78	0,95	0,81	0,83		1,04							
Torre Molina RE/RP		0,3	2,33	-2,2	1	0,69	0,39	1,99	0,79		1,5							
RE/RR		1,3	0,97	-1,6	1,08	1,25	0,94	1,17	1,24		1,16							
Finca del Escobar RE/RP		0,06	2,29	-1,5	1,15	0,18	0,24	1,25	1,05		0,56							
RE/RR		1,08	0,82	1,01	1,00	1,00	1,18	1,19	1,23		1,00							

Figura 4.- Relaciones R_E/R_P vs. R_E/R_R para las desalinizadoras de La Aldea (Gran Canaria) y recta teórica de ajuste según los valores de M y N de la Tabla 11

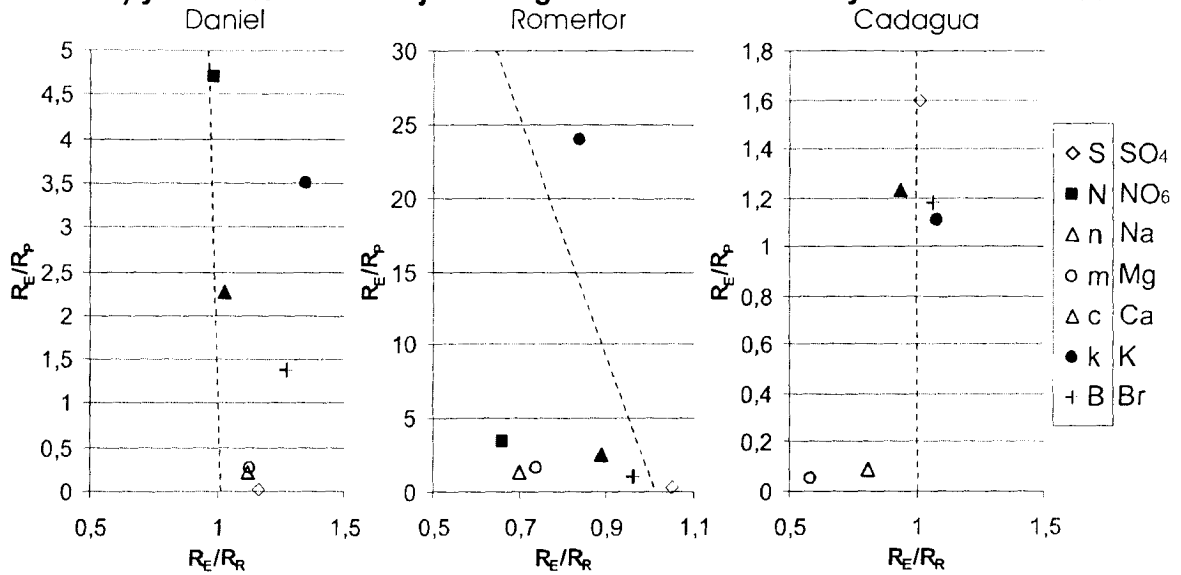


Figura 5.- Relaciones R_E/R_P vs. R_E/R_R para las desalinizadoras de Murcia-Alicante y recta teórica de ajuste según los valores de M y N de la Tabla 12

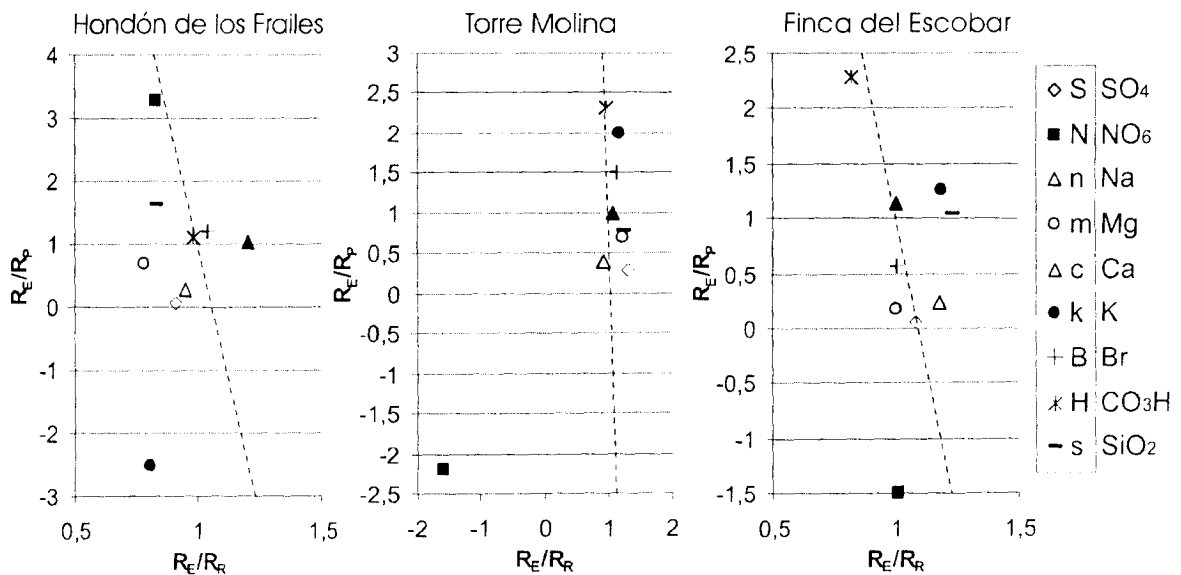


Tabla 13.- Comportamiento de las relaciones iónicas durante la desalinización por osmosis inversa, en relación al agua de alimentación (entrada)

Relación	En agua producto	En agua de rechazo	Observaciones
rNa/rK	Decrece algo	Similar	No característico
rSO ₄ /rCl	Decrece mucho	Algo superior	Posible agua dulce < mar
rMg/rCl	Decrece notablemente	Varía poco	Incierto
rMg/rCa	Varía poco o crece algo	Varía poco	Incierto
rCl/rBr	Decrece algo	Varía poco	