



Instituto Geológico y Minero de España

PROYECTO:

**METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN
HIDROGEOLÓGICA DE FORMACIONES
ACUÍFERAS PROFUNDAS.**

**APLICACIÓN A LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA
08.07 “EL MAESTRAZGO”. HIPROMA**

**ASISTENCIA TÉCNICA: INTERPRETACIÓN DE
PERFÍLES SÍSMICOS Y SONDEOS PROFUNDOS DE
HIDROCARBUROS**

Autores GESSAL:
J. Klimowitz, E. Hernández y G. Ruiz

Supervisión IGME:
J. Plata, M. Mejías y A. Barnolas



JULIO 2006

ÍNDICE

I.- INTRODUCCIÓN	1
II.- SÍNTESIS METODOLÓGICA	2
II.1.- RECOPIACIÓN Y VALORACIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE	2
LISTADO DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA	4
SONDEO MAESTRAZGO-1	6
SONDEO SALSADELLA-1	9
SONDEO BOBALAR-1	10
SONDEO BOBALAR-2	11
II.2.- ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN SELECCIONADA	12
II.2.1.- ESTUDIO DE SONDEOS	13
II.2.2.- INTERPRETACIÓN SÍSMICA	14
III.- SÍNTESIS DE DATOS DE LOS SONDEOS PROFUNDOS	16
III.1.- SONDEO MAESTRAZGO	17
III.2.- SONDEO SALSADELLA -1	30
III.3.- SONDEO BOBALAR-1	35
III.4.- SONDEO BOBALAR-2	41
III.5.- CORRELACIÓN SONDEOS	45
IV.- SINTESIS GEOLÓGICA	46
V.- INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA Y GEOFÍSICA DE PERFILES SÍSMICOS	54
V.1.- AREA DE BOBALAR-MORELLA	55
V.2.- AREA DE SALSADELLA-VINAROS	58
V.3.- AREAS DE ALBOCACER, CUEVAS DE VINROMA Y TORREBLANCA	59
VI.- CONCLUSIONES E IMPLICACIONES HIDROGEOLÓGICAS	61

FIGURAS

1. Área de estudio y posición de perfiles sísmicos y sondeos
2. Columna estratigráfica y horizontes sísmicos de estudio
3. Perfil Sísmico CT-88-29 interpretado
4. Calado del sondeo Maestrazgo -1 en el Perfil Sísmico SM-14
5. Perfil Sísmico SM-3 interpretado
6. Mapa del isocronas del techo del Triásico (Área Bobalar-Morella)
7. Mapa de isocronas del techo del Triásico (Área Salsadella)
8. Mapa de isobatas del techo del Triásico
9. Esquema estructural del área de estudio

ANEXOS

1. Mapa de posición de perfiles sísmicos y sondeos E: 1:100.000
2. Mapa de posición de perfiles sísmicos, sondeos y cartografía geológica 1:100.000
3. Documento Síntesis del sondeo Maestrazgo -1
4. Documento Síntesis del sondeo Salsadella -1
5. Documento Síntesis del sondeo Bobalar -1
6. Documento Síntesis del sondeo Bobalar -2
7. Sismograma sintético del sondeo Maestrazgo -1
8. Sismograma sintético del sondeo Salsadella -1
9. Correlación estratigráfica de los sondeos del área de estudio
10. Correlación estructural de los sondeos del área de estudio
11. Perfil sísmico CT87-05
12. Perfil sísmico CT88-27
13. Perfil sísmico CT88-29
14. Perfil sísmico CT88-31
15. Perfil sísmico SM-1
16. Perfil sísmico SM-2
17. Perfil sísmico SM-2N
18. Perfil sísmico SM-3
19. Perfil sísmico SM-12
20. Perfil sísmico SM-14
21. Mapa de isobatas del techo del Triasico Área de Bobalar- Morella 1:50000
22. Mapa de isobatas del techo del Triasico Área de Salsadella 1:50000
23. Mapa de isobatas del techo del Triasico Área de Albocacer- Cuevas de Vinroma-Torreblanca 1:75000
24. Cortes geológicos
25. Esquema resumen de ficheros de datos integrados del sondeo Bobalar-1
26. Esquema resumen de ficheros de datos integrados del sondeo Bobalar-2
27. Esquema resumen de ficheros de datos integrados del sondeo Maestrazgo-1
28. Esquema resumen de ficheros de datos integrados del sondeo Salsadella-1

METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE FORMACIONES ACUÍFERAS PROFUNDAS. APLICACIÓN A LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 08.07 “EL MAESTRAZGO”. HIPROMA

ASISTENCIA TÉCNICA: INTERPRETACIÓN DE PERFILES SÍSMICOS Y SONDEOS PROFUNDOS DE HIDROCARBUROS

I.- INTRODUCCIÓN

El presente informe expone la memoria de actividades y conclusiones que, con objetivo hidrogeológico, han sido desarrolladas para el proyecto “*INTERPRETACIÓN DE PERFILES SÍSMICOS Y SONDEOS PROFUNDOS DE HIDROCARBUROS*”, proyecto integrado en las actividades del estudio, de mayor alcance, que el IGME desarrolla en la actualidad en la comarca del Maestrazgo: “Investigación sobre el comportamiento hidrogeológico de formaciones acuíferas profundas. Aplicación a la Unidad Hidrogeológica 08.07 en el Maestrazgo”.

La memoria recoge la síntesis de dichas actividades, basadas en la interpretación geológica e hidrogeológica de los datos geofísicos de subsuelo (información de sísmica de reflexión y de sondeos profundos), procedentes de la exploración histórica de hidrocarburos en la zona y sus resultados, como aportación al objetivo de caracterización de la infraestructura de recursos hídricos del acuífero regional Jurásico del Maestrazgo, situado en el sector más septentrional de la Cuenca Hidrográfica del Júcar.

El proyecto HIPROMA tiene como objetivos establecer el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero profundo del Maestrazgo y estimar sus recursos hídricos, tratando de conjugar la información obtenida en estudios de superficie: cartográficos,

datos de infraestructura hidrogeológica, modelo hidrogeológico conceptual, etc., con los datos geofísicos de subsuelo, como complemento para completar la caracterización hidrogeológica del subsuelo del área.

II.- SÍNTESIS METODOLÓGICA

II.1.-Recopilación y valoración de la información existente

Ha sido revisada la totalidad de la información disponible procedente de la exploración de hidrocarburos y de otros trabajos de investigación del subsuelo (almacenamiento inducido de gas, ENAGAS) en distintos fondos documentales (IGME, Servicio de Hidrocarburos del MINISTERIO INDUSTRIA COMERCIO Y TURISMO, REPSOL YPF y el propio de GESSAL). A partir de su valoración, se ha procedido a la recopilación de la información de interés para los objetivos del proyecto y su reinterpretación aplicada.

Una vez valorada la calidad, interés y aplicación a los objetivos programados, ha sido recopilada la información de cuatro sondeos de exploración de hidrocarburos en el área (Maestrazgo 1, Bobalar 1, Bobalar 2 y Salsadella 1) y de dos sondeos próximos en su entorno, debido al interés que implica su situación geográfica y analogía geológica (sondeos Maestrazgo 2 y Mirambel 1). También se ha procedido a la recopilación de unos setenta y cinco perfiles sísmicos (Figura 1, Anexos 1 y 2).

La información de sondeos recopilada (Anexos 25, 26, 27 y 28), ha consistido en los informes finales de los sondeos, "master log" (diagramas de perforación), diagráfias más representativas disponibles y la columna litológica de dichos sondeos.

Para los cálculos petrofísicos de diagráfias, con los sistemas informáticos adecuados, se ha procedido a la digitalización de los correspondientes perfiles en papel. Los cálculos hidrogeofísicos e hidrogeoquímicos han sido obtenidos con los programas específicos de interpretación petrofísica GEOGRAPHIX y/o PEP (PETROSYS), según se describirá mas adelante.

los siguientes:

- Sondeo Maestrazgo1 (CAMPSA 1977), que alcanzó la profundidad final de 2948 m (Nivel geológico alcanzado: Permo-Estefaniense).
- Sondeo Salsadella 1 (AUXINI 1975), que alcanzó la profundidad final de 1073 m (Nivel geológico alcanzado: Pérmico).
- Sondeo Bobalar 1 (COPAREX 1963) que alcanzó la profundidad final de 1860 m (Nivel geológico alcanzado: Muschelkalk Medio).
- Sondeo Bobalar 2 (COPAREX 1963) que alcanzó la profundidad final de 2591,6 m (Nivel geológico alcanzado: Muschelkalk Medio).

La situación de los sondeos Bobalar 1 y 2 ha sido precisada mediante la revisión en campo mediante posicionamiento con GPS, debido a las diferencias existentes en su localización en mapas previos, así como en los valores de coordenadas presentados distintos informes y bases de datos. Con ello se ha permitido despejar las dudas existentes y se ha podido disponer de una información básica y precisa para el calado de dichos sondeos en los perfiles sísmicos.

También han sido incluidos en el estudio, por su interés y su aportación geológica, los siguientes sondeos próximos a la zona de estudio:

- Sondeo Maestrazgo 2 (CAMPSA 1981) que alcanzó la profundidad final de PF: 2862 m (Nivel geológico alcanzado: Buntsandstein).
- Sondeo Mirambel-1 (AUXINI 1974) PF: 2811 m (Nivel geológico alcanzado: Paleozoico).

Toda la información recopilada (informes, sondeos y líneas sísmicas) ha sido escaneada en formato TIF, PDF, algunas diagráfias de sondeos digitalizadas, en formato LAS, y anexada como documentación complementaria al informe, a modo de fondo documental que se lista a continuación:

LISTADO DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA

SÍSMICA PROYECTO MAESTRAZGO-IGME 2006
 (EN IMAGEN .TIF)

CAMPAÑA	NOMBRE LÍNEA	SP INICIAL	SP FINAL	Nº SECCIONES	ESCALAS	TIPO DE PROCESADO
C	C1N	24	154	1	1:10	Stack Tr Lejanas
	C1N	24	154	1	1:10	Stack Tr Cercamas
	C1N	24	154	1	1:10	Stack interpretad
	C1N	24	154	1	1:10	Stack
	C-01S	155	333	1	1:10	Stack
	C1-01S	155	333	1	1:10	Stack interpretad
	C-03	25	245	1	1:10	Stack
	C-03	25	245	1	1:10	Stack interpretad
V	V1	25	321	2	1:10	Stack
	V1	25	321	2	1:10	Stack intreprerad
	V2C	168	204	1	1:10	Stack
	V2C	168	204	1	1:10	Stack intreprerad
	V2E	24	112	1	1:10	Stack
	V2E	24	112	1	1:10	Stack intreprerad
	V2W	252	320	1	1:10	Stack
	V2W	252	320	1	1:10	Stack interpretad
SM						
	SM-01	25-343		2	1:10, 1:5	Stack
	SM-02-24	125-322		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-02N	24-78		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-02N	24-78		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-02S	24-134		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-02S	24-134		1	1:10, 1:5	Stack interpretad
	SM-03	24-200		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-03	24-200		1	1:10, 1:5	Stack interpretad
	SM-05	131-330		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-06	126-335		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-07	128-286		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-08	126-325		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-09	25		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-10	126-302		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-11	126-295		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-12	126-359		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-13	129-374		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-14	126-321		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-15	138-338		1	1:10, 1:5	Stack
	SM-16	126-251		1	1:10, 1:5	Stack
SM-16PROL	923-1123		1	1:10, 1:5	Stack	
SM-17	121-251		1	1:10, 1:5	Stack	
SM-17PROL	253-422		1	1:10, 1:5	Stack	
SM-18	125-239		1	1:10, 1:5	Stack	
SM-18PROL	1123-1012		1	1:10, 1:5	Stack	
SM-19	125-263		1	1:10, 1:5	Stack	
SM-20	125-705		1	1:10, 1:5	Stack	
SM-21	121-349		1	1:10, 1:5	Stack	

MA	MA-06	125	649	2	1:5	Stack
	MA-12	125	247	1	1:5	Stack
	MA-13	125	495	1	1:5	Stack
	MA-14	125	459	1	1:5	Stack
	MA-15	125	287	1	1:5	Stack
	MA-19	125	235	1	1:5	Stack
	MA-20	126	235	1	1:5	Stack
	MA-21	125	235	1	1:5	Stack
	MA-29	125	231	1	1:5	Stack
CT-87	CT-87-01	1096	2617	1	1:10	MIGRATED
	CT-87-02	1111	1936	1	1:10	MIGRATED
	CT-87-03	1141	2931	1	1:10	MIGRATED
	CT-87-04	1095	3852	1	1:10	MIGRATED
	CT-87-05	1097	2605	1	1:10	Stack
CT-88	CT-88-01	1096	1457	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-02X	1096	1478	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-03	1096	1798	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-05	1208	1794	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-06	1096	1834	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-10	1096	1914	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-11	1096	1822	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-12	1096	2270	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-13	1096	1484	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-14	1096	1874	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-15	1096	2064	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-16	1096	1623	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-17	1096	1727	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-18	1096	1574	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-19	1096	1580	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-20	1111	1797	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-21	1096	1335	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-22	1096	2094	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-23	1096	2090	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-24	1096	1706	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-25	1096	1826	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-26	1096	1628	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-27	1096	1864	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-28	1096	1916	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-29	1096	1800	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-30	1096	1731	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-31	1096	2005	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-32	1096	1671	1	1:10	MIGRADA
	CT-88-33	1096	1578	1	1:10	MIGRADA

MAESTRAZGO-1								
TÍTULO	ESCALA	RUN	TECHO	MURO	LONGITUD	CURVAS DIGITALIZADAS	TIF	LAS
Borehole Compensated Sonic Log	1:500	1	10	200	190	-Gr -Dt	BOREHOLE_COM P_ SONIC_LOG.TIF	DT_GR_MAESTRAZGO-1-10-2484.las
Borehole Compensated Sonic Log	1:500	2	375	1625	1250	-Gr -Dt	BOREHOLE_COM P_ SONIC_LOG.TIF	DT_GR_MAESTRAZGO-1-10-2484.las
Borehole Compensated Sonic Log	1:500	2	200	415	215	-Gr -Dt	BOREHOLE_COM P_ SONIC_LOG.TIF	DT_GR_MAESTRAZGO-1-10-2484.las
Borehole Compensated Sonic Log	1:500	3	1750	2490	740	-Gr -Dt	BOREHOLE_COM P_ SONIC_LOG.TIF	DT_GR_MAESTRAZGO-1-10-2484.las
Borehole Compensated Sonic Log	1:200	4	2474	2904.8	430	-Gr -Dt		DT_GR_MAESTRAZGO-1-2475-2900.las
Simultaneous Compensated Neutron Formation Density	1:200	1	204	410	206	-Rhob -Drho	RHOB_ MAESTRAZGO.TIF	RHOB_maestrazgo1.las DRHOB_maestrazgo1.las
Simultaneous Compensated Neutron Formation Density	1:200	2	350	1624	1274	-Rhob -Drho	RHOB_ MAESTRAZGO.TIF	RHOB_maestrazgo1.las DRHOB_maestrazgo1.las
Simultaneous Compensated Neutron Formation Density	1:200	3	1184	2486	440	-Rhob -Drho	RHOB_ MAESTRAZGO.TIF	RHOB_maestrazgo1.las DRHOB_maestrazgo1.las
Simultaneous Compensated Neutron Formation Density	1:200	4	2474	2908	474	-Rhob -Drho	RHOB_ MAESTRAZGO.TIF	RHOB_maestrazgo1.las DRHOB_maestrazgo1.las

TÍTULO	ESCALA	RUN	TECHO	MURO	LONGITUD	CURVAS DIGITALIZADAS	TIF	LAS
Borehole Compensated Sonic Log (with caliper)	1:200	2	204	410	206		BHCS_8303.TIF	
Borehole Compensated Sonic Log (with caliper)	1:200	2	350	1625	1275		BHCS_8304.TIF	
Borehole Compensated Sonic Log	1:200	3	1784	2487	703		BHCS_8305.TIF	
Borehole Compensated Sonic Log	1:200	4	2474	2900	1374		BHCS_8306.TIF	
Borehole Compensated Sonic Log (with caliper)	1:200	1	0	210	210		BHCS_GR-8302.TIF	
Casing Collar and Perforating	1:200	1	1784	2475	691		Casing Collar and Perforating.tif	
Cement Bond Log	1:200	1	218	2486	2268		CBL_8309.TIF	
Cement Bond Log	1:200	3	498	615	117		CBL_8310.TIF	
Cement Bond Log	1:200	2	1275	2375	1100		CBL_8311.TIF	
Dual Laterolog Simultaneous	1:200	1	204	409	205		DLL_MSFL_8315.TIF	
Simultaneous Dual Laterolog Microspherical Log	1:200	2	350	1624	1274		DLL_MSFL_8316.TIF	
Simultaneous Dual Laterolog Microspherical Log	1:200	3	1764	2465	701		DLL_MSFL_8317.TIF	

TÍTULO	ESCALA	RUN	TECHO	MURO	LONGITUD	CURVAS DIGITALIZADAS	TIF	LAS
Simultaneous Dual Laterolog Microspherical Log	1:200	4	2474	2906	432		DLL_MSFL_8318 .TIF	
Continuous Dipmeter	1:200	4	2474	2948	474		HDT_8336.TIF	
Continuous Dipmeter	1:200	1	105	1625	1520		HDT_8335.TIF	
Microlaterolog with Caliper	1:200	1	204	410	206	-CALI	MLL_ML_8323.tif	CALIPER_0200- 0400.las
Microlaterolog with Caliper	1:200	2	350	1624	1274	-CALI	MLL_ML_8324.tif	CALIPER_0400- 1625.las
Microlaterolog with Caliper	1:200	3	1784	2468	684	-CALI	MLL_ML_8325.tif	CALIPER_1725- 2450.las
Microlaterolog Microlog	1:200	4	2474	2909	435	-CALI	MLL_ML_8326.tif	CALIPER_2450- 2915.las
Informe final Maestrazgo-1								
Informe de Implantación, programa técnico, y presupuesto							-Log fundamental -Composite Log -Panel de correlación de sondeos del área de estudio. -Geochemical Log -CPI Coriband	

Nota: Los tiff tanto de DT y GR como los de densidades están unidos, salvo el run 4 del Borehole Compensated Sonic Log.

SALSADELLA-1

Nota: Los tiff tanto de DT y GR como los de densidades están unidos.

TÍTULO	ESCALA	RUN	TECHO	MURO	LONGITUD	CURVAS	TIF	LAS
Borehole Compensated Sonic Log	1:500	1	256	570	314	-Gr -DT	Salsadella-1.tif	Salsadella-1.las
Borehole Compensated Sonic Log (with caliper)	1:500	1	567	1071	504	-Gr -DT	Salsadella-1.tif	Salsadella-1.las
Compensated Formation Density Log. Gamma gamma	1:500	1	567	1073	506	-Rhob -Drho	Salsadella-1.tif	Salsadella-1.las
Caliper Log	1:500	1	7	571	564		Salsadella-1.tif	
Neutron Porosity Log	1:500	1	567	1073	506		Salsadella-1.tif	
Log Fundamental	1:500	1	0	1072	1072		Salsadella-1.tif	
Laterolog	1:500	1	567	1073	506		Salsadella-1.tif	

BOBALAR-1

TÍTULO	ESCALA	RUN	TRAMO	TECHO	MURO	LONGITUD	CURVAS	TIF	LAS
Medición del diámetro	1:500	2		570	1400	830	-cali	PcaL_Pcorte4621.tif	CALIPER_0885-1650.las CALIPER_1650-1800.las
Medición del diámetro	1:500	3		840	1650	810	-cali	PcaL_Pcorte4622.tif	CALIPER_0885-1650.las
Medición del diámetro	1:500	1		10	870	860	-cali	PcaL_Pcorte4620.tif	CALIPER_0000-0885.las
Medición del diámetro	1:500	1		1370	1800	430	-cali	PcaL_Pcorte.tif	CALIPER_1650-1800.las
Log fundamental	1:500		1	0	200	200		LITOLOGIA-4625.tif	
Log fundamental	1:500		2	200	400	200		LITOLOGIA-4625-3699.tif	
Log fundamental	1:500		3	400	600	200			
Log fundamental	1:500		4	600	800	200		LITOLOGIA-4625-37023.tif	
Log fundamental	1:500		5	800	1000	200		LITOLOGIA-4625-3691.tif	
Log fundamental	1:500		6	1000	1200	200		LITOLOGIA-4625-3696.tif	
Log fundamental	1:500		7	1200	1400	200		LITOLOGIA-4625-3700.tif	
Log fundamental	1:500		8	1400	1600	200		LITOLOGIA-4625-3701.tif	
Log fundamental	1:500		9	1600	1800	200			
Log fundamental	1:500		10	1800	2000	200		LITOLOGIA-4625-3692.tif	
Gamma ray-neutorn	1:500	1		10	850	840	-GR - NEUTRON	GR_NEUTRON.tif	BOBALAR-GR-NEUTRON.las
Gamma ray-neutorn	1:500	2		850	1850	1000	-GR - NEUTRON	GR_NEUTRON-4614.tif	BOBALAR-GR-NEUTRON.las
Laterolog	1:500	1		879	1404	525		res_res_sp4615.tif	
Laterolog	1:500	2		1375	1495	120		res_res_sp4616.tif	
Laterolog	1:500	3		1000	1653	653		res_res_sp4617.tif	
Laterolog	1:500	4		1624	1859	235		res_res_sp4618.tif	

BOBALAR-2

TÍTULO	ESCALA	RUN	TRAMO	TECHO	MURO	LONGITUD	CURVAS	TIF	LAS
MICROCAPLIPER	1:500	1		1100	1750	650		MICROCAL_RES_RES-4692.tif	
MICROCAPLIPER	1:200	1		1150	1375	225		MICROCAL_RES_RES-4693.tif	
Gamma rey-neutrón	1:500	1		50	1050	1000		GR_NEUTRON-4689.tif	
Log fundamental	1:500		1	0	200	200		LITOLOGIA-3720.tif	
Log fundamental	1:500		2	200	400	200		LITOLOGIA-3713.tif	
Log fundamental	1:500		3	400	600	200		LITOLOGIA-3708.tif	
Log fundamental	1:500		4	600	800	200		LITOLOGIA-3706.tif	
Log fundamental	1:500		5	800	1000	200		LITOLOGIA-3715.tif	
Log fundamental	1:500		6	1000	1200	200		LITOLOGIA-3712.tif	
Log fundamental	1:500		7	1200	1400	200		LITOLOGIA-3709.tif	
Log fundamental	1:500		8	1400	1600	200		LITOLOGIA-3707.tif	
Log fundamental	1:500		9	1600	1800	200		LITOLOGIA-3710.tif	
Log fundamental	1:500		10	1800	2000	200		LITOLOGIA-3723.tif	
Log fundamental	1:500		11	2000	2200	200		LITOLOGIA-3719.tif	
Log fundamental	1:500		12	2200	2400	200		LITOLOGIA-3711.tif	
Log fundamental	1:500		13	2400	2600	200		LITOLOGIA-3717.tif	
Laterolog	1:500	2		1100	1750	200		SP_RES_RES4691.tif	
Laterolog	1:500	1		50	1050	1000		SP_RES_RES4691.tif	
Temperatura	1:500	1		500	1050	550		TEMPERATURA-4965.tif	

II.2.-Estudio de la información seleccionada

Una vez conocida y evaluada la información de subsuelo disponible, la aplicación metodológica ha contemplado dos aspectos, diferenciados según los objetivos, para los que cada tipo de información es apropiada. Estos son el estudio de la información de sondeos profundos y el estudio e interpretación aplicada de los perfiles de sísmica de reflexión.

- El primer aspecto consiste en el estudio de la información de sondeos a partir, fundamentalmente, de los datos petrofísicos (diagráfias), pruebas de producción, informes de análisis de fluidos y demás información de perforación (pérdidas de lodo durante la perforación, ganancias, dilución del lodo, etc.). Con todo ello se ha contribuido a la caracterización de formaciones acuíferas (cálculos o valoraciones de porosidad, permeabilidad, presión, etc.), como de los fluidos (características de salinidad, temperatura, etc.).
- Un segundo aspecto ha consistido en la interpretación y extensión de la información puntual establecida en los sondeos sobre los perfiles sísmicos, con lo que se ha conseguido un seguimiento areal y en profundidad de la geometría y extensión de las formaciones acuíferas y sello, en función del mallado de la situación de perfiles sísmicos. A partir de dicha información se ha interpretado la continuidad y extensión de las formaciones acuíferas, así como su estructura y características geométricas de profundidad, potencia, conexión y evolución lateral. La información obtenida ha sido recogida y plasmada en los correspondientes mapas de isobatas e isopacas. En ciertas zonas en que no existe continuidad en el mallado sísmico (que quedan evidenciadas en el mapa de posición: Figura 1, Anexo 1), la interpretación ha sido completada con criterios basados en los rasgos geológicos-estructurales de superficie.

El desarrollo de ambos aspectos ha permitido la evaluación del tipo y calidad de las aguas así como la extensión y evolución de los acuíferos en profundidad.

II.2.1. Estudio de sondeos:

Una vez actualizada y establecida la síntesis estratigráfica de las series atravesadas (anexos 3 a 6), el estudio de la información de los sondeos se ha centrado en el reconocimiento de las formaciones acuíferas con su interpretación detallada y puntual a partir de informes finales, diagráfias, pruebas de producción, salinidades, presiones, etc., complementada por la interpretación petrofísica de diagráfias, habiendo sido individualizadas y correlacionadas las distintas formaciones, de las que se ha completado una estimación genérica de sus características hidrogeológicas.

El estudio, con los programas específicos de interpretación petrofísica de la información de las diagráfias obtenidas en la perforación de sondeos, ha permitido la caracterización de acuíferos desde dos puntos de vista:

- Cuantificación o evaluación de las características físicas de la formación geológica acuífera: (porosidad y permeabilidad) e individualización de formaciones impermeables.
- Cálculos químicos sobre la naturaleza del agua, como salinidad y otros de capacidad de disolución-temperatura, etc.

Los valores establecidos para definir el carácter salino de las aguas se basarán en la siguiente clasificación de concentraciones:

- Agua dulce: < 1.000 ppm de ClNa.
- Agua salobre: 1.000-15.000 ppm de ClNa.
- Agua salada: > 15.000 ppm de ClNa.

Otro aspecto del estudio de los sondeos ha consistido en la elaboración de sismogramas sintéticos, que ha permitido su "calado" sobre los perfiles sísmicos. Mediante el seguimiento de los horizontes sísmicos las formaciones acuíferas han podido ser delimitadas y seguidas bajo el área cubierta por el mallado sísmico, cuyos resultados han sido recogidos en mapas de isocronas posteriormente transformados a mapas de profundidad.

Un último aspecto del estudio de sondeos ha consistido en la revisión de las pruebas de producción realizadas en ellos para la evaluación de las formaciones acuíferas, que aportan datos de análisis químicos de naturaleza y composición del agua, así como la medida de presiones, permeabilidades, evolución de caudales y tiempo de recuperación.

II.2.2. Interpretación sísmica:

El mallado sísmico disponible presenta una cobertura parcial del área de estudio y está formado por perfiles de las siguientes campañas de sísmica de reflexión:

- Campañas CT 87 y CT 88 (HISPANOIL 1987-1988).
- Campaña MA (CAMPSA-SHELL 1979).
- Campaña SM (CAMPSA 1975).
- Campaña C (CAMPSA 1975).
- Campaña V (CAMPSA 1975).

Las actividades de interpretación sísmica se resumen en los siguientes aspectos:

- Calado de sondeos a partir de la elaboración de gráficos tiempo/profundidad o de sismogramas sintéticos, para la identificación de los horizontes de interés (Anexos 7 y 8).
- Interpretación estructural de subsuelo. Identificación de los diferentes dominios tectoestratigráficos (Anexos 9 y 10).
- Cartografía de horizontes. Elaboración de mapas de isocronas. Transformación tiempo-profundidad y elaboración de mapas de isobatas (Anexos 21 a 23).
- Selección e interpretación de secciones sísmicas representativas que ilustran convenientemente los rasgos geológicos en la zona de estudio (Anexos 11 a 20).

A partir de estos estudios han sido generados los siguientes mapas a escala 1:100.000:

- Mapa de posición de sondeos y perfiles sísmicos (Anexos 1 y 2).
- Mapas de isocronas del Techo de Trías (Figura 6 y 7).
- Mapas de isobatas del Techo de Trías (Anexos 21 a 23).

Las campañas CT 87 y CT 88 con cobertura 2400%, y la campaña MA, con cobertura 1200%, se extienden sobre el sector de la subcuenca de Morella y presentan buena resolución para la definición de la serie del Jurásico y del Cretácico. La campaña SM, con cobertura 2400%, presenta una calidad de media a baja, a partir de la que se ha realizado el seguimiento de distintos reflectores que han permitido la interpretación de la geometría estructural de la cuenca de Salsadella, así como el calado e interpretación de los horizontes sísmicos representativos y en relación con los acuíferos según la correlación de los sondeos.

Las campañas C y V, con cobertura 1200%, por su baja calidad, definición y resolución sísmica, no han aportado suficiente información relevante para la interpretación del subsuelo en el dominio Sur del área de estudio. Cualquier posible interpretación de estos perfiles requiere de un alto nivel de subjetividad en el reconocimiento de los escasos y discontinuos reflectores presentes en estos perfiles.

Según se puede apreciar en el Anexo 2 (Mapa de posición de perfiles sísmicos, sondeos y cartografía geológica) parte de los perfiles están dispuestos paralelos a las grandes alineaciones estructurales (fallas lítricas) no habiéndose obtenido resolución suficiente. Los perfiles dispuestos en posición perpendicular a estos accidentes tampoco presentan definición sísmica suficiente para definir las distintas unidades estructurales atravesadas, pudiendo ser debido a problemas de la baja cobertura, dispersión de la energía sísmica y/o a un deficiente procesado.

Además del seguimiento areal de las formaciones, la interpretación sísmica ha contribuido, mediante su reconocimiento estructural a la caracterización de la potencial conexión hidráulica de las zonas de carga hasta las zonas de confinamiento.

III. SÍNTESIS DE DATOS DE LOS SONDEOS PROFUNDOS:

Los sondeos profundos de exploración de hidrocarburos perforados en la zona que cubre el estudio, como ya se ha citado son: Maestrazgo 1, y Salsadella 1 localizados en la subcuenca de Salsadella, y Bobalar 1 y Bobalar 2, localizados en la estructura del mismo nombre, en el área tabular central de Morella-Bobalar. También se ha contado con la información de otros dos sondeos, por su interés debido a la proximidad y analogía geológica: Maestrazgo 2 y Mirambel 1.

A continuación se resumen los datos estratigráficos y petrofísicos, así como el análisis cualitativo de los datos hidrogeológicos de los sondeos profundos de hidrocarburos perforados en la zona de estudio y de los que también se ha elaborado un nuevo documento- diagrama síntesis de sondeo (Anexos 3, 4, 5 y 6).

Todos los datos han sido reinterpretados para este estudio mediante la caracterización en diagráfias de las formaciones estratigráficas actualizadas definidas en los estudios y publicaciones recientes.

III.1. SONDEO MAESTRAZGO 1: (Anexo 3)

CAMPSA 1977. Z Kb (Z Kb = altura cota topográfica de la "kelly bushing" o coronarotor situada en la plataforma o mesa de rotación para la perforación del sondeo): 166 m. PF (profundidad final alcanzada en el sondeo): 2.948 m (Permo-Estefaniense).

Coordenadas de posición:

Longitud: 00° 20' 14" E **X:** 782996 UTM HUSO 30
Latitud: 40° 27' 24" N **Y:** 4483873

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA:

- 0 m – 385 m: **FORMACION ARTOLAS: Hauteriviense-Barremiense**

Calizas, calizas margosas y margas en una serie en la que se aprecia un contraste litológico a 210 m en el que se pasa de calizas a margas, según contacto apreciable en diagráfias. Entre 210 m y 385 m la serie se hace margosa progresivamente a techo y calcárea a la base con un cambio fuerte a 268 m. Se aprecia presencia de anhidrita entre 365 m y 370 m.

Según los datos del informe final de sondeo, la formación contiene agua dulce y zonas de karst: 40-46 m y 60 m a 210 m y la porosidad media del tramo es en torno al 21% con permeabilidad es alta.

- 385 m - 548 m: **FORMACIONES GAITA-LLÁCOVA: Valanginiense- Hauteriviense:**

Calizas margosas y calizas.

La unidad contiene agua dulce sin zonas de evidencia de karstificación, ya que su proporción margosa parece inhibir el desarrollo kárstico. Según los datos recogidos en el informe final de sondeo, la porosidad media del tramo es del 7,5 al 14% y su permeabilidad es alta.

- 548 m - 675 m: **FORMACIÓN BASTIDA: Valanginiense:**

Calizas con baja proporción margosa, con arcillas en zonas de pérdidas parciales por desarrollo kárstico. Presencia de dolomías a la base.

La unidad contiene agua dulce con pérdidas parciales entre 569 m y 610 m, que responden a intervalos de cavernas kársticas (desarrollo de caving según el calibre del pozo) entre 559

m y 590 m, y de 603 a 612 m. La porosidad media del tramo es del 9 al 15% y su permeabilidad es alta, según los datos del informe final de sondeo.

- 675 m - 842 m: FORMACIÓN POLACOS: Berriasiense

Calizas. Presencia de arcillas en las escasas zonas de desarrollo kárstico (entre 749 y 768 m). Poca proporción margosa. Presencia de dolomías a la base de la unidad.

Presencia de agua dulce y desarrollo kárstico entre 749 m y 768 m.

- 842 m – 1000 m: FORMACION BOBALAR: Titónico- Berriasiense (Equivalente fm. Calizas de Higuieruelas).

Dolomías, calizas dolomíticas y dolomías calcáreas. No se observa desarrollo kárstico.

La porosidad media del tramo es del 8 %, con permeabilidad alta. Presencia de agua dulce, según los datos del informe final de sondeo.

- 1000 m - 1111 m: FORMACIÓN ASCLA – RITMITAS DE LORIGUILLA: Titónico.

Calizas, calizas margosas o dolomíticas y margas. Se observa desarrollo kárstico entre el techo de la formación y la cota 1021 m, así como entre 1040 y 1046 m.

La porosidad media del tramo es del 8 %, con permeabilidad alta, según los datos del informe final de sondeo.

Agua dulce. Presencia de SH₂ durante la perforación que evidencia la actuación de un karst de corrosión.

- 1111 m - 2010 m: FORMACIONES PULPIS – SOT DE CHERA: Oxfordiense- Kinmeridgiense.

Calizas, calizas margosas o dolomíticas y dolomías. Se observa desarrollo kárstico en las cotas 1263 m (perdidas parciales), 1400 m (perdidas parciales), 1513 m (pérdidas totales) , y a 1950 m (pérdidas totales y parciales), debidas a desarrollo kárstico. La porosidad media del tramo es del 7 %, con permeabilidad alta, según los datos del informe final de sondeo.

Presencia de agua dulce.

- **2010 m – 2035 m: FORMACIÓN YÁTOVA: Oxfordiense.**

Calizas margosas y margas. Se observa desarrollo kárstico a la base, de 2030-2035 m. No se dispone de datos de porosidad, aunque conceptualmente se estima una media mas baja que las formaciones infra y suprayacente, por su proporción margosa. Presencia de agua dulce.

- **2035 m – 2219 m: FORMACIÓN CHELVA.**

+ **MIEMBRO LA TOSSA: Calloviense 2035 m a 2100 m:** dolomías y finas pasadas de calizas margosas. Se observa desarrollo kárstico (perdidas parciales a 2075 m).

+ **MIEMBRO CALIZAS DE CASINOS: (Aalenense-Calloviense) 2100 m a 2219 m.**

Calizas, calizas margosas, con intercalaciones de margas y dolomías.

Su porosidad es desconocida.

- **2219 M – 2252 m: FORMACIÓN MARGAS Y CALIZAS DEL TURMIEL: Toarciense.**

Calizas, margas y dolomías. No se aprecian evidencias de desarrollo kárstico.

La porosidad media de la unidad es del 7 % con baja permeabilidad, según los datos del informe final de sondeo.

- **2252 M – 2279 m: FORMACIÓN CALIZAS BIOCLÁSTICAS DE BARAHONA: Pliensbachiense superior.**

Calizas con presencia minoritaria de margas y dolomías. Se aprecia desarrollo kárstico (perdidas totales a 2268 m). La porosidad media del tramo es del 8 % su permeabilidad alta. Presencia de agua dulce, según los datos del informe final de sondeo.

- **2279 m - 2321 m: FORMACIÓN MARGAS GRISES DE CERRO DEL PEZ: Sinemuriense-Pliensbachiense superior.**

Calizas con presencia margas y dolomías. Se observa desarrollo kárstico (perdidas totales a 2313 m). La unidad tiene permeabilidad alta y presencia de agua dulce, según los datos del informe final de sondeo.

- **2321 m - 2403 m: FORMACIÓN CUEVAS LABRADAS: Sinemuriense-Pliensbachiense.**

Calizas y dolomías con ausencia de margas, lo que aparentemente incide en su mayor

desarrollo kárstico entre 2360 m y 2400 m. Se produjeron pérdidas totales entre 2350 m y la base de la formación. La porosidad media de la unidad varía entre el 8 y el 11% con alta permeabilidad. Agua con 1320 ppm de cloruros (carácter salobre, muy próximo al carácter dulce establecido en 1000 ppm) , según los datos del informe final de sondeo.

- **2403 m – 2514 m: FORMACIÓN CORTES DE TAJUÑA: Retiense-Hettangiense.**

Dolomías y anhidritas con presencia de arcillas en zonas karstificadas entre 2360 m y 2400 m. Se produjeron pérdidas totales en zona dolomíticas a techo de la unidad (entre 2403 m y 2416 m, 2425 m a 2453 m y 2468 m a 2480 m). La porosidad media en las litologías dolomíticas es del 14%. Su permeabilidad es alta, según los datos del informe final de sondeo.

- **2514 - 2760 m: MUSCHELKALK MEDIO (M-II).**

Infrayaciendo la fm Cortes de Tajuña, por desaparición por falla del Trías superior y parte del Trías medio, aparece la serie el MII, compuesta por arcillas, anhidritas, halita, arenas, y trazas de caliza. Aparentemente similar al Keuper, aunque por estructuración, mayor potencia y ausencia de Fm. Imón se considera M-II.

Para esta unidad se interpreta que el sondeo la corta en una posición estructural de alto en labio levantado, bajo plano de falla normal, que desplaza hundiendo la serie mesozoica superior.

2760 - 2833 m: BUNTSANDSTEIN.

Caracterizado por areniscas arcillas y trazas de anhidritas, en secuencia positiva granodecreciente que culmina con facies tipo Röt.

2833 - 2948 m (TD): PERMO-ESTEFANIENSE.

Areniscas y arcillas. Frecuente presencia de carbón.

Los valores de porosidad en las arenas de esta formación no superan el 3,5%, según los datos del informe final de sondeo, en aparente contraste con los mayores valores encontrados en las series carbonáticas mesozoicas.

Cálculos de porosidad:

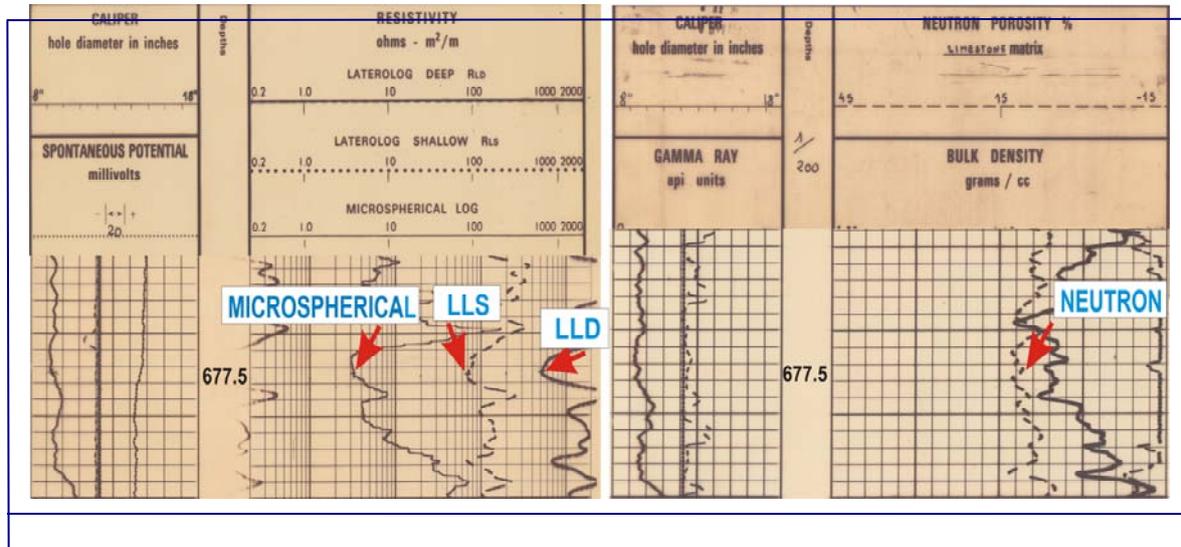
Los cálculos petrofísicos, para la evaluación hidrogeológica de las formaciones, en cuanto a porosidad, salinidad del agua y evaluación cualitativa de permeabilidad, han sido realizados a partir de las curvas: LLD (Sonda de resistividad, Laterlog deep o profundo), LLS (laterolog shallow o somero), Microspherical y Neutron.

Las tres curvas de resistividad (LLD, LLS, Microspherical) proporcionan información sobre la invasión del lodo en la formación, así como sobre la salinidad del agua de formación.

Respecto al Neutron, indica lecturas directas sobre la porosidad de la roca, ya que la sonda está calibrada para litologías calizas.

El estudio se inició centrándose en las cotas en las que se realizaron pruebas de producción o test denominados DST en la exploración de hidrocarburos (drilling system test), para evidenciar la posible existencia de contraste de resultados a partir de ambos tipos de datos. Al comparar los valores obtenidos en los DST con las lecturas de porosidad del Neutron se optó por desechar las obtenidas en los DST y tomar las del Neutron por correctas. La diferencia entre unos y otros valores, se estima producida por la posible incidencia del desarrollo kárstico de los carbonatos que produce disparidad de valores entre la porosidad puntual más uniforme de los tramos de formación sin karstificación (la que se puede calcular por la interpretación petrofísica) y los tramos sometidos a karstificación, siempre irregular en su distribución, que modifica los valores globales de la porosidad que se pueden evaluar en los DST.

- A 667.5 m. la resistividad medida por el:
Microspherical es de 3.3 Ohmm.
Shallow es de 70 Ohmm.
Deep es de 500 Ohmm.



A esta profundidad, con los datos de la diagrafía se obtiene una resistividad (LLD) de 500 Ohm.m y una porosidad, a partir del Neutron, del 12%.

Para evaluar el factor de formación se ha usado la formula de Archie:

$$F = a / \phi^m$$

Aplicada al caso particular:

$$F = 1 / 0.12^2$$

$$F = 69.44$$

A partir del factor de formación y de la resistividad profunda (LLD), se obtiene la resistividad del agua para la zona profunda:

$$R_w = R_t / F$$

Sustituyendo:

$$R_w = 500 \text{ Ohmm} / 69.44$$

$$R_w = 7.2 \text{ Ohmm}$$

Usando el diagrama "Gen-9" de Schlumberger de calculo de ppm. de ClNa, se calcula una concentración de ClNa de 805 ppm. para una temperatura de 68 °F obtenida en las medidas realizadas durante la testificación geofísica de sondeo e incluida en la información de las diagrafías) y una resistividad de la solución de 7.2 Ohmm.

Para el desarrollo de Archie el factor de formación corresponde a:

$$F = a / \emptyset^m$$

Siendo: "m" el factor de formación igual a 2.

"a" el factor de tortuosidad, en este caso 1.

A partir del factor de formación y conociendo la Resistividad total (Rt), que se lee directamente en la curva de resistividad profunda, se halla la resistividad del agua (Rw):

$$Rw = Rt / F$$

Con los valores de Rw y la temperatura de la formación (calculable mediante un gradiente térmico a partir de la temperatura de fondo de pozo) se cruzan los datos en la tabla Gen-9 de Schlumberger, para obtener la salinidad en ppm.

Para el cálculo de salinidad a partir de resistividad:

Los análisis petrofísicos a partir de datos de diagráfia, son comunes en la industria exploratoria de hidrocarburos y sus metodologías y protocolos están estandarizados y aceptados por la comunidad científico/técnica. Estos análisis están fundados en los experimentos y formulaciones establecidas por Guus Archie, geólogo de Royal Dutch-Shell, que a su vez aplicó los estudios previos sobre resistividad y su relación con los fluidos de la formación y la porosidad realizados por Conrad y Marcel Schlumberger.

La forma estándar de dicha ecuación es:

$$Sw = \text{sqrt} ((a \times Rw) / (Rt \times \emptyset^m))$$

Donde :

Sw= saturación de agua

Rw=resistividad del agua de formación

Rt=resistividad total (roca+fluido)

\emptyset =porosidad

a=factor de tortuosidad

m=exponente de cementación

Estas fórmulas, están principalmente encaminadas al cálculo de la Saturación en agua de una formación (S_w), es decir, el tanto por ciento de volumen poroso que está ocupado por agua, considerándose que si la saturación en agua es de por ejemplo 20%, el 80% restante está ocupado por algún tipo de hidrocarburo.

Como pasos previos, es necesario calcular la resistividad del agua de formación (en relación inversa con la salinidad de dicho fluido) y la porosidad de la formación.

Entendemos por resistividad la "oposición" de un medio rocoso a la transmisión de la corriente eléctrica.

Si consideramos un nivel completamente saturado en agua ($S_w=1$, o 100% de agua en el medio poroso), la fórmula anterior queda de la siguiente forma:

$$S_w = 1 = \sqrt{a \times R_w / (R_t \times \emptyset m)}$$

El valor de R_t (resistividad total del conjunto roca+agua) procede de una diagráfia de resistividad de alta penetración (tipo Deep induction, laterologo deep, etc) que evite la posible influencia de invasión por lodo de perforación (mezcla de lodo de perforación y agua de formación).

Porosidad, \emptyset , es el tanto por ciento de espacio intergranular, lleno de fluido. Este valor se puede calcular a partir de sondas de tipo sónico, de densidad o nucleares (neutrón) y su determinación no ofrece dificultades especiales.

Los parámetros m y a , son los que relacionan R_t y R_w por medio del factor de formación. Consideramos como regla general que la roca es aislante (exceptuando las arcillas) y sólo se transmite la corriente por los fluidos existentes en el medio poroso.

Podemos, por tanto considerar este medio poroso lleno de fluido como el "cable" por el que se transmite la corriente. Si el fluido es agua, es evidente que a mayor porosidad ("más cable") la corriente se va a transmitir mejor, con lo que la lectura de R_t va a ser menor que en una roca de iguales características mineralógicas, igual composición de agua pero menos porosidad (sin embargo, el valor de R_w será el mismo, puesto que el agua de formación es idéntica).

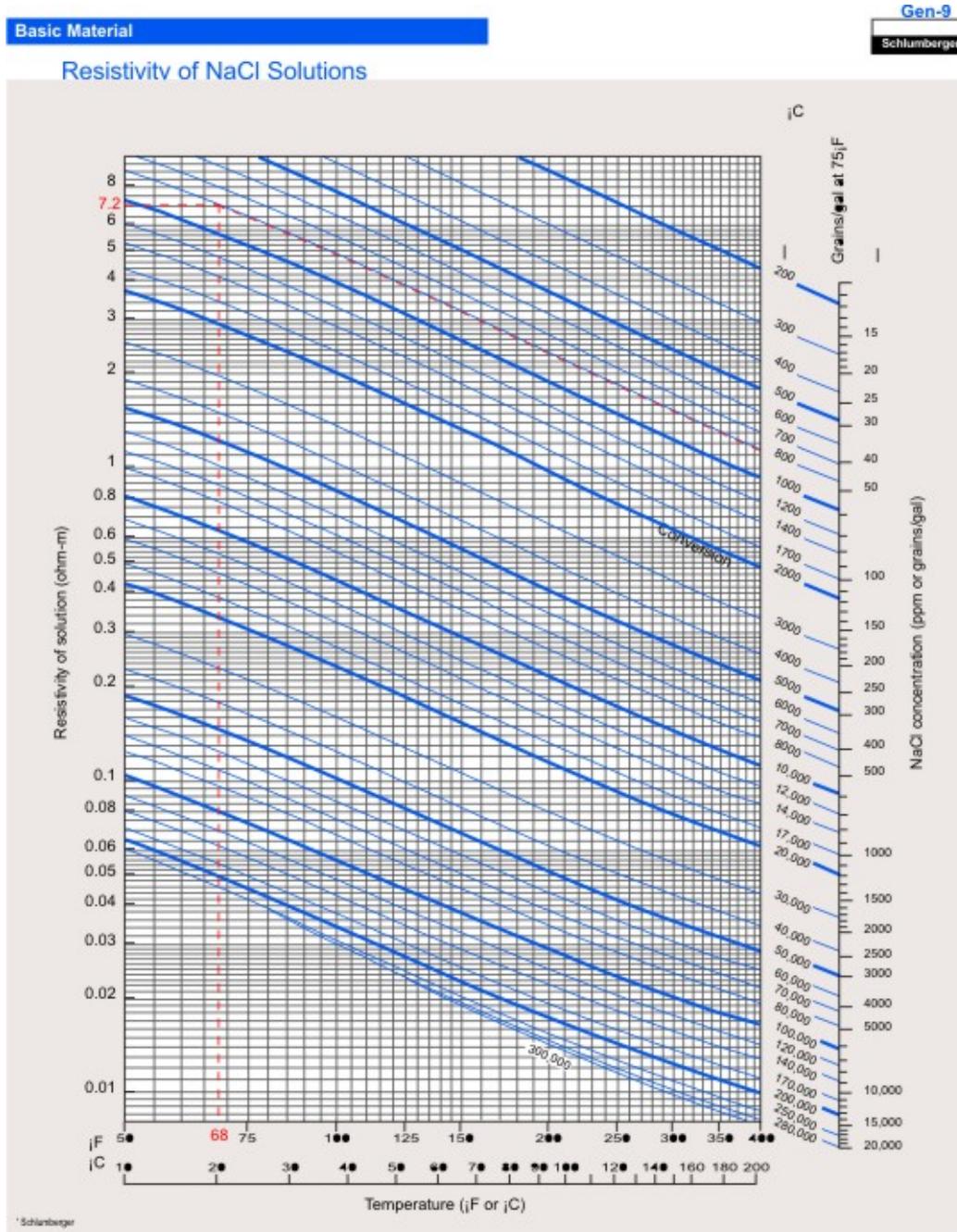
De igual forma que ocurre con la corriente eléctrica transmitida a través de un cable de cobre, la forma de éste va a hacer que la resistencia al paso de la corriente eléctrica sea mayor o menor; un cable muy fino y enrollado sobre sí mismo, como el filamento del interior de las bombillas, opone una gran resistencia al paso de la corriente eléctrica.

Medios porosos muy tortuosos, van a oponer una mayor resistencia al paso de la corriente que medios porosos con poca tortuosidad, aunque el % de porosidad sea el mismo.

Estos parámetros m y a , se calculan bien a partir de ensayos de laboratorio en testigo de roca o a partir de ábacos (universalmente aceptados).

Una vez calculada la resistividad del agua R_w , es evidente que esta está relacionada con la salinidad del agua. Aguas con muchas partículas disueltas, van a conducir la electricidad mejor que aguas con pocas partículas en disolución. La relación entre R_w y salinidad (ppm de NaCl eq) pasa por el conocimiento de la temperatura de formación.

A más temperatura, la movilidad iónica es mayor, y por tanto, la conducción de la electricidad es mejor (menores resistividades).



1-5

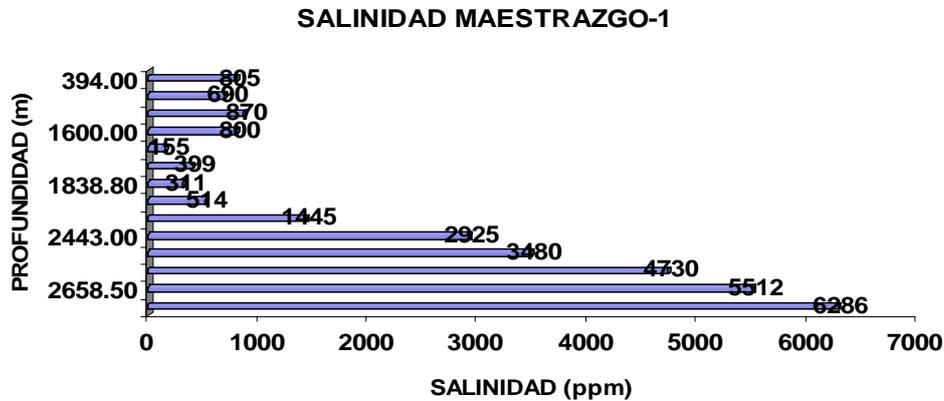
Los resultados indican que la poca invasión de lodo que se produce es gradual, por el gran salto que observado en los datos de resistividad entre la sonda Microspherical y Shallow, y que la permeabilidad no es muy grande, ya que la sonda que mide en profundidad presenta valores de salinidad propios de un agua dulce. A bajas resistividades, pequeñas variaciones de porosidad generan grandes

variaciones de la R_w y por lo tanto la estimación de salinidad se hace más dificultosa.

- A 1358.5 m y a 1544.5 m es difícil obtener valores fiables de salinidad ya que la porosidad presenta valores que no permiten usar la formula de Archie. De ahí que el desarrollo de la formula indique unos valores de salinidad anómalos para esas profundidades.

PROFUNDIDA D	POROSIDA D	FACTOR- FORM	RT	RW	T ^a	PPM	SALINIDA D
394.00	0.14	51.02	340.00	6.66	68.53	805	DULCE
667.50	0.12	69.44	500.00	7.20	73.90	690	DULCE
1392.00	0.17	34.60	170.00	4.91	88.11	870	DULCE
1600.00	0.27	13.72	70.00	5.10	92.19	800	DULCE
1805.50	0.14	51.02	1200.00	23.52	96.22	155	DULCE
1820.50	0.10	100.00	950.00	9.50	96.52	399	DULCE
1838.80	0.10	100.00	1200.00	12.00	96.88	311	DULCE
1885.50	0.07	224.10	1650.00	7.36	97.79	514	DULCE
2338.00	0.13	59.17	150.00	2.54	106.67	1445	SALOBRE
2443.00	0.14	51.02	65.00	1.27	108.73	2925	SALOBRE
2457.00	0.14	51.02	55.00	1.08	109.01	3480	SALOBRE
2504.50	0.02	2500.00	2000.00	0.80	109.94	4730	SALOBRE
2658.50	0.03	1111.11	750.00	0.68	112.96	5512	SALOBRE
2874.50	0.12	69.44	40.00	0.58	117.20	6286	SALOBRE

- Entre 1800 y 1900 la salinidad se mantiene por debajo de los 600 ppm y es a partir de 2000 cuando comienza a subir por encima de 1000 ppm, indicando la presencia de agua salobre. Esta salinidad se puede deber a que halla una alta invasión y las lecturas de resistividad sean del agua de formación mezclada con el lodo, en este caso agua salada.
- En todo el sondeo variaciones del 1% en la porosidad originan cambios en la estimación de la salinidad del orden de 300 ppm. A bajas resistividades, pequeñas variaciones de porosidad hacen variar mucho la R_w y por lo tanto la estimación de salinidad se manifiesta difícil.



Análisis cualitativo:

En la Formación Artolas, primeros 400 m los valores de densidad se mantienen en torno a 2.65 – 2.7 aunque las lecturas varían por la presencia de margas y las distintas resistividades se mantienen en valores altos, lo cual indica, junto con un estimación de la porosidad en torno al 20 %, que la formación ha sufrido procesos de karstificación y disolución que ha dado lugar a una importante porosidad y permeabilidad, y de ahí las pérdidas totales.

La resistividad del agua obtenida es propia de un agua dulce.

Los siguientes 450 m, Formaciones Gaitas, Bastida y Polacos, principalmente calizas con margas, se caracterizan por una bajada en la porosidad hasta valores en torno al 6%.

Respecto a las resistividades, las más someras presentan valores más bajos que las profundas que se mantienen en los mismos valores, por lo que se deduce una menor permeabilidad. El tipo de agua encontrada sigue siendo dulce.

Entre 850 y 2000, Formaciones Bobalar, Ascla, Pulpis, Esquivel y Sot de Chera, compuesto por calizas que cambian a dolomías según se profundiza en la serie.

Se observa valores de porosidad en torno al 8%, habiendo mas permeabilidad en

la parte superior, que en la inferior, aunque en todo momento con valores altos. Se

La salinidad del agua va en aumento según se profundiza aunque sigue teniendo naturaleza dulce.

De 2000 a 2500, Formaciones Yatova, Cuevas Labradas y Cortes de Tajuña, con una litología mas caliza en la parte superior que cambia a dolomítica en la inferior con algún nivel de anhidrita.

La permeabilidad decrece y la porosidad aumenta en la parte inferior a valores medios de 14%. Se mantienen las perdidas totales debido a la karstificación.

A esta profundidad la salinidad crece, observándose el cambio químico de valores de agua dulce a salobre y salada.

El Muschelkalk, compuesto por anhidritas, desde 2500 a 2750 m presenta porosidad muy baja, 2-3%. El tipo de agua sigue siendo salada hasta la profundidad final del sondeo, incluido el Buntsandstein, que presenta valores de mayor porosidad.

III.2. SONDEO SALSADELLA 1: (Anexo 4)

AUXINI 1975. Z Kb (cota de la "kelly bushing"): 419 m. PF (profundidad final): 1072 m (Pérmico).

Coordenadas de posición:

Longitud: 00° 10' 19" E	X: 769261	UTM HUSO 30
Latitud: 40° 23' 08" N	Y: 4475460	

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA:

- **0 m - 105 m: FORMACIONES PULPIS – SOT DE CHERA: Oxfordiense-Kinmeridgiense.**

Calizas fracturadas/karstificadas, calizas arcillosas, margas, y arcillas. Se observan evidencias desarrollo kárstico entre las cotas 90- 105 (perdidas totales)

- **105 – 128 m: FORMACIÓN YÁTOVA: Oxfordiense.**

Calizas margosas, margas y arcillas.

No se aprecia desarrollo kárstico.

- **128 – 397 m: FORMACIÓN CHELVA.**

+ **MIEMBRO LA TOSSA: Calloviense 128 m a 303 m.** dolomía, dolomía calcárea con intercalaciones de calizas (a veces bioclásticas). Hacia techo la serie se hace mas caliza y margosa (entre 128 m y 209 m). Se interpreta desarrollo kárstico, en facies dolomíticas, a partir de la cota 200 m hasta su base.

+ **MIEMBRO CALIZAS DE CASINOS: (Aalenense-Calloviense) 303 m a 397 m.** Calizas, calizas margosas o arcillosas, con intercalaciones de margas y dolomías.

Se interpreta desarrollo kárstico entre 330 m y el muro a 397 m.

- **397 – 415 m: FORMACIÓN MARGAS Y CALIZAS DEL TURMIEL: Toarciense**

Alternancia de margas, arcillas y calizas margosas o arcillosas, con intraclastos, a veces dolomitizadas.

Se aprecia desarrollo kárstico intenso (pérdidas totales en todo el tramo y según la interpretación de diagráfias con valores de sonic-gr-calibre anómalos) desde el techo de la formación hasta la cota 412 m.

- 415 – 430 m: FORMACIÓN CALIZAS BIOCLÁSTICAS DE BARAHONA: Pliesbachiense superior.

Calizas a veces arcillosas o margosas. Evidencia de desarrollo kárstico por pérdidas totales de lodo durante la perforación.

- 430 - 453 m: FORMACIÓN MARGAS GRISES DE CERRO DEL PEZ: Sinemuriense-Pliesbachiense superior.

Calizas, calizas arcillosas y margas. Durante la perforación se produjeron pérdidas totales de lodo (descritas en el diagrama de perforación de sondeo) que se interpretan en relación a desarrollo kárstico. Por logs, según los valores de sónico y gamma ray, se identifican los tramos de mayor evolución kárstica entre 430 m y 440 m y a la base entre 451 m y 453 m.

- 453 - 510 m: FORMACIÓN CUEVAS LABRADAS: Sinemuriense-Pliesbachiense.

Calizas dolomíticas y dolomías y calizas y margas. Durante la perforación de esta unidad también se produjeron pérdidas totales, definiéndose por diagráfias (valores anómalos en sónico-gamma ray) los tramos de mayor evolución kárstica entre 461 m y 463 m y a la base entre 490 m y la base de la formación.

- 510 – 610 m: FORMACIÓN CORTES DE TAJUÑA: Retiense-Hettangiense.

Dolomías, dolomías arcillosas y arcillas, y anhidritas masivas intercaladas. Presencia de tramos karstificados. Aspecto carniolar. Intervalos brechoides de elementos dolomíticos. Pérdidas totales desde el techo hasta 573 m.

- 610 - 818 m: MUSCHELKALK inferior (M-I).

Alternancias de bancos de calizas, a veces dolomíticas, o arcillosas y dolomías. Presencia de anhidrita.

- 818 - 1014 m: BUNTSANDSTEIN.

Entre el techo y la cota 849 m: facies Röt: arcilla roja algo dolomítica micácea. Areniscas y limolitas rojo oscuro. Desde 849 m hasta 1014 m: Alternancia de arenisca roja y arcilla calcárea dolomítica.

Se produjeron pérdidas totales entre 874 m y 885 m y entre 911 m a 966 m, interpretadas como ligadas a zonas de fracturación. La porosidad calculada de las areniscas en este tramo varía entre el 7 % al 16 % (según el informe final de sondeo), lo que constituye unos valores altos poco frecuentes para el Buntsandstein.

- 1014 - 1073 m (TD): PÉRMICO:

Intercalaciones de arcillas y arenisca carbonática (de tamaño de grano fino a conglomerado). Pasadas de limos y presencia de carbón.

La porosidad calculada para las arenas de esta unidad es similar a la de la serie Buntsandstein, oscilando los valores entre el 7,5 % y el 12,5 % (descritas en el informe geológico final de de sondeo).

Cálculos de porosidad:

Las diagráfias que se han utilizado para realizar los cálculos de salinidad en el sondeo Salsadella-1 son las siguientes:

Laterolog, Rhob y Drho (ambos de densidad), Sónico, Calibre, Gamma Ray y SP (potencial espontáneo).

Los datos de porosidad que se obtienen a partir de la curva Neutron (lecturas de porosidad directas), no coinciden con los que se obtienen a partir de formula que relaciona densidad de la matriz (D_m) y del lodo (D_f) con la densidad leída por la sonda (D):

$$\emptyset = (D_m - D) / (D_m - D_f)$$

Se aprecian diferencias en torno al 30%, por lo que los cálculos de salinidad realizados con ambas porosidades difieren ampliamente.

Mediante la evaluación de la porosidad teniendo en cuenta la Densidad y el Sónico (tabla CP-7 de Schlumberger) se obtienen valores de porosidad muy diferentes a los anteriores.

PROFUNDIDAD D (m)	POROSIDAD NEUTRON (%)	POROSIDAD Dma-Df- (densidad) Rhob (%)	POROSIDAD DT-RHOB (sónico- densidad)(%)
625.00	0.760	0.047	0.01
650.00	0.060	0.006	0.01
700.00	0.030	0.035	0.04
750.000	0.023	0.047	0.06
800.00	0.075	0.012	0.06
850.00	0.083	0.041	0.024
900.00	0.070	0.032	0.045
950.00	0.070	0.037	0.043
1000.00	0.103	0.026	0.03
1050.00	0.047	0.012	0.04

Por último si se comparan estos datos con los que se presentan en el informe final de sondeo para el Buntsandstein (de 818 hasta TD) las diferencias son mayores, ya que en el informe final de sondeo se cuantifican valores de porosidad del 7.5 a 16 %.

Al depender directamente la salinidad de la porosidad, con la calidad de los datos resulta difícil precisar una estimación, pero los valores de porosidad que se proponen como más adecuados son los obtenidos a partir de la sonda Neutron, y han sido esos datos los utilizados para los cálculos de salinidad:

Los valores que obtenemos aplicando la formula de Archie son los siguientes:

PROFUNDIDA D (m)	POROSIDA D (%)	FACTOR- FORM	RT (Ohmm)	RW (Ohmm)	Tª (°F)	PPM	SALINIDA D
625.00	0.076	173.13	3000.00	17.33	89.49	229	DULCE
650.00	0.060	277.78	3000.00	10.80	90.64	371	DULCE
700.00	0.030	1111.11	2000.00	1.80	92.93	2372	SALOBRE
750.00	0.023	1890.36	2000.00	1.06	95.23	4057	SALOBRE
800.00	0.075	177.78	350.00	1.97	97.52	2059	SALOBRE
850.00	0.083	145.16	70.00	0.48	99.82	8918	SALOBRE
950.00	0.070	204.08	700.00	3.43	104.41	1074	SALOBRE
1050.00	0.047	452.69	110.00	0.24	109.00	17063	SALADA

Según estos valores se diferencia una zona con agua dulce hasta unos 650 m, una salobre hasta los 950 m y otra salada hasta la profundidad final de sondeo.

En los primeros 600 m se apreciaron numerosas zonas de pérdidas relacionadas con karstificación y fracturas, localizándose en esta unidad los niveles de agua dulce. A 610 m se localiza una falla que separa el Muschelkalk del Lías, provocando una barrera hidrogeológica al situarse la entrada de agua salobre en el Muschelkalk.

El mayor cambio o contraste de salinidades se puede situar a 818 m, donde una nueva falla separa el Muschelkalk del Buntsandstein. Se aprecia una bajada importante en la densidad, sónico y resistividad en el Buntsandstein respecto a la parte superior del sondeo, junto con un aumento de la porosidad, que se interpreta como un paso de las facies carbonatadas a siliciclásticas, que tienen una mayor porosidad, y una bajada en la densidad.

La menor resistividad podría estar relacionada con la presencia de agua de formación salada, aunque también influye el que esta unidad tenga una mayor porosidad.

Los datos obtenidos a partir de la sonda Neutron corroboran la presencia de agua salada, según los cálculos de la aplicación metodológica desarrollada en el presente

III.3. SONDEO BOBALAR 1: (Anexo 5)

INI-COPAREX 1963. Z Kb (cota de la "kelly bushing"): 1194 m. PF (profundidad final): 1860 m (Muschelkalk 2 – Muschelkalk II)

Coordenadas de posición:

Longitud: 00° 14' 38.6" W **X:** 774710 UTM HUSO 30

Latitud: 40° 33' 02" N **y:** 449403

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA:

- **0 m – 22 m: FORMACION BOBALAR: Tithónico- Berriasiense (Equivalente Fm Calizas de Higuieruelas).**

Caliza a veces oolítica. Presencia, a techo, de arcillas rojas de relleno kárstico.

- **22 m - 110 m: FORMACIÓN ASCLA – RITMITAS DE LORIGUILLA: Titónico.**

Calizas y calizas margosas con miliólidos y calizas dolomíticas, a veces de aspecto hojoso y arcillas.

- **110 m - 607 m: FORMACIONES PULPIS – SOT DE CHERA: Oxfordiense-Kinmeridgiense.**

Calizas, calizas dolomíticas y dolomías. Unidad con desarrollo kárstico entre las cotas 365-380 m (perdidas totales en tramo dolomítico. Otras evidencias de karstificación por presencia de arcilla roja de karstificación y brechas de colapso.

- **607 m – 629 m: FORMACIÓN YÁTOVA: Oxfordiense:**

Calizas margosas y margas. No se aprecia desarrollo kárstico.

- **629 m – 700 m: FORMACIÓN CHELVA.**

Dolomía calcárea con intercalaciones de calizas (a veces bioclásticas), margosas hacia la base de la unidad. Porosidad muy baja (menor del 2%, según el informe final de sondeo).

+ MIEMBRO LA TOSSA: Caloviense 629 m a 666 m.

Dolomías y finas pasadas de calizas con bioclastos.

+ MIEMBRO CALIZAS DE CASINOS: (Aalenense-Caloviense) 666 m a 700 m.

Dolomías y calizas intercaladas, calizas y dolomías margosas.

- 700 m –718 m: FORMACIÓN MARGAS Y CALIZAS DEL TURMIEL: Toarciense.

Alternancia de caliza margosa, con intraclastos a veces dolomitizada. No se aprecian evidencias de desarrollo kárstico. Valores de porosidad media del 15 % (según el informe final de sondeo).

- 718 m – 737 m: FORMACIÓN CALIZAS BIOCLÁSTICAS DE BARAHONA: Pliesbachiense superior.

Dolomías a veces arcillosas con microfisuras de calcita por relleno de vías de disolución. Porosidad media del 4% (según el informe final de sondeo).

- 737 m - 805 m: FORMACIÓN MARGAS GRISES DE CERRO DEL PEZ: Sinemuriense-Pliesbachiense superior.

Dolomías y calizas dolomíticas a veces arcillosas. Bioclastos y vías de disolución de desarrollo kárstico con precipitación de calcita. Porosidad media del 4% (según el informe final de sondeo).

- 805 - 855 m: FORMACIÓN CUEVAS LABRADAS: Sinemuriense-Pliesbachiense.

Calizas dolomíticas y dolomías y calizas que se hacen arcillosas hacia la base. Valores de porosidad media del 3 - 4% (según el informe final de sondeo) .

- 855 – 965 m: FORMACIÓN CORTES DE TAJUÑA: Retiense-Hettangiense.

Dolomías y anhidritas con presencia de arcillas en zonas karstificadas entre 939 m y 942 m (testigo 1). Aspecto carniolar. Intervalos brechoides de elementos dolomíticos. Los valores de porosidad media varían del 2 al 12 % según tramos (datos tomados dell informe final de sondeo).

- **965 – 1005 m: Fm IMÓN : Retiense.**

Dolomías calcáreas e inclusiones de calcita. Porosidad media del 13 % (según el informe final de sondeo) .

- **1005 - 1250 m: KEUPER.**

Arcillas, anhidritas y halita. Cuarzos bipiramidales.

- **1250 - 1413 m: MUSCHELKALK SUPERIOR (M-III).**

Dolomía arcillosa a arcilla dolomítica hojosa, calizas y margas. Presencia de juntas de arcillas carbonosas interestratificadas. Unidad poco permeable salvo la zona de calizas fracturadas y con pérdidas parciales encontrada entre 1385,5 m y 1404 m. Valores de porosidad media del 1 - 3 %. Naturaleza del agua salada (salinidad del agua calculada 100 g/l, calculada por petrofísica).

- **1413 - 1860 m (TD): MUSCHELKALK MEDIO (M-II).**

Alternancias de sal, anhidrita y arcillas en una potente serie de la que no se alcanza su muro.

Cálculos de porosidad:

El estudio petrofísico del sondeo Bobalar-1 se ha realizado en base a las curvas existentes de resistividad, porosidad, gamma ray, calibre y densidad.

La resistividad fue registrada por una sonda CMD de Schlumberger, de la que se desconoce el alcance en la formación.

La porosidad fue medida por la sonda Neutron, calibrada según antiguas unidades cps (counts per second) (no API), por lo cual, al no estar adaptados los ábacos de transformación de unidades de Slumberger, no se han podido realizar los cálculos correspondientes. Por este motivo los valores de porosidad fueron tomados de los indicados en el informe final del sondeo.

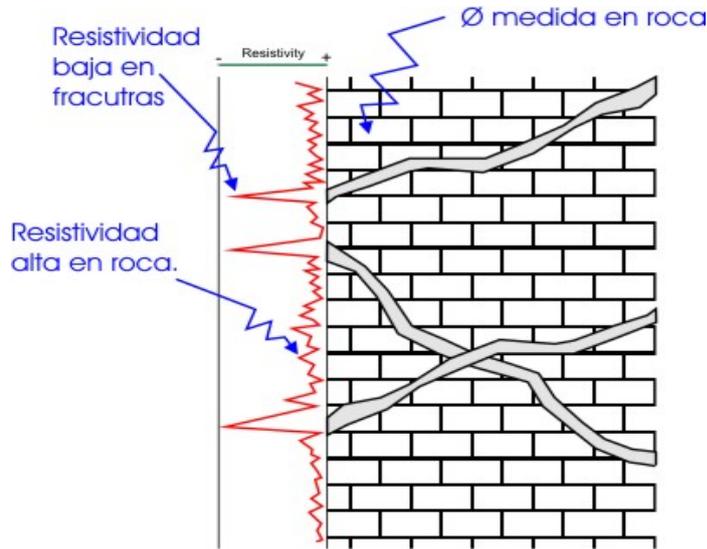
En el intervalo entre las cotas de sondeo 567 m -1073 m se dispone de las curvas de densidad y densidad corregida: Rhob y Drho.

Se ha usado el desarrollo de Archie para obtener una estimación de la salinidad, para ello es necesario conocer la porosidad y la resistividad de la formación.

$$R_w = R_t / (1 / \phi^2)$$

Los valores de resistividad interpretados, en un principio, fueron los más bajos, con el fin de controlar las zonas con mayor contenido en agua de formación.

En la columna del sondeo Bobalar-1 la resistividad es más baja en zonas de fracturas (mayor porosidad). Un problema para la interpretación ha consistido en que los valores de porosidad indicados en el informe final del sondeo es una media en cada intervalo, con lo cual esta porosidad es válida para la litología pura, y no para las fracturas. Así pues se han cruzado datos de porosidad tomados de la "roca" con datos de resistividad tomados de la fracturas.

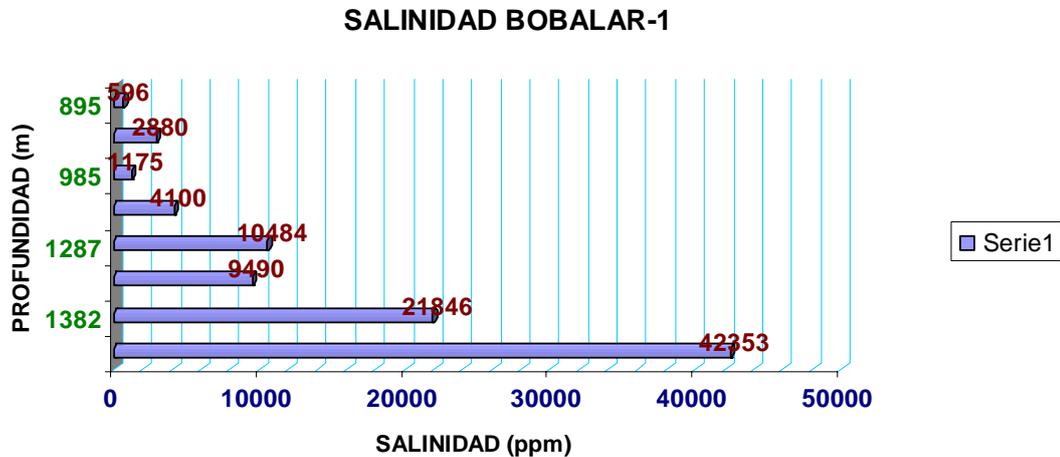


Probablemente, al contrario de lo que ocurre con las mezclas hidrocarburo- agua, la resistividad es más alta (medida en la formación) en las zonas con poca porosidad (también correspondiente a la formación) y la resistividad es más baja en zonas con más porosidad, como las fracturas.

A partir de estas premisas hemos obtenido la siguiente estimación de salinidades:

PROFUNDIDA D (m)	POROSIDA D (%)	FACTOR-FORM	RT (Ohmm)	RW (Ohmm)	Tª (ºF)	PPM	TIPO AGUA
895	0.12	69.44	460	6.624	94.1	596	DULCE
921	0.03	1111.11	1630	1.467	95	2880	SALOBRE
985	0.13	59.17	200	3.38	96.8	1175	SALOBRE
1007	0.13	59.17	60	1.014	98.6	4100	SALOBRE
1287	0.03	1111.11	410	0.369	113	10484	SALOBRE
1310	0.03	1111.11	450	0.405	113	9490	SALOBRE
1382	0.03	1111.11	205	0.1845	114.8	21846	SALADA
1397	0.03	1111.11	110	0.099	118.4	42353	SALADA

A la profundidad de 900 m se pasa de agua dulce a salobre y alrededor de 1350 m de salobre a salada, lo cual concuerda con los datos de los test, que se han llevado



Análisis cualitativo:

En la serie Malm, de 0 a 600 m, (Fm. Sot de Chera) en la parte superior se aprecian niveles de arcilla, que desaparecen según se profundiza. Siguiendo la curva de Neutron, se puede observar como la porosidad aumenta hasta los 400 m, cota a partir de la cual disminuye. En el Dogger se puede observar un aumento importante de la porosidad y se apreciaron pérdidas totales en zonas karstificadas (brechas). Se interpreta que el agua presente en estos niveles será dulce, ya que a 900 metros, en continuidad, se aprecia la presencia de agua dulce.

El Dogger y Lías, de 600 a 905 m (Fm. Chelva, Cerro del Pez y Cortes de Tajuña), presentan litologías de mayor carácter dolomítico que el Malm, aunque hay niveles calizos presentes en la parte inferior (Fm. Casinos y Cortes de Tajuña, respectivamente). También se aprecia un aumento del contenido arcilloso.

La salinidad del agua aumenta hacia el contacto con el Keuper, aunque siempre en con valores salobres sin alcanzar valores salinos.

El Keuper (incluyendo la Fm Imán) y la serie Muschelkalk, presentan porosidades bajas, en torno al 3%. Toda la serie, menos el MIII, tiene contenido anhidrítico.

El MIII esta formado por dolomías que cambian a calizas según aumenta la profundidad, la porosidad y permeabilidad son bajas, aunque en este nivel hay

METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE FORMACIONES ACUÍFERAS PROFUNDAS. APLICACIÓN A LA UNIDAD
HIDROGEOLÓGICA 08.07 "EL MAESTRAZGO". HIPROMA
ASISTENCIA TÉCNICA: INTERPRETACIÓN DE PERFILES SÍSMICOS Y SONDEOS PROFUNDOS DE HIDROCARBUROS IGME
perdidas parciales debido a la facturación.

Los valores de salinidad estimados para esta serie, son indicativos de agua salada.

III.4. SONDEO BOBALAR- 2: (Anexo 6)

INI-COPAREX 1963. Z Kb (a cota del "Kelly bushing": 1166 m. PF (profundidad final de sondeo): 2592 m (Muschelkalk medio – MII)

Coordenadas de posición:

Longitud: 00° 14' 15.6" W	X: 774177	UTM HUSO 30
Latitud: 40° 32' 55" N	Y: 4493767	

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA:

- **0 - 52 m: FORMACIÓN ASCLA – RITMITAS DE LORIGUILLA: Titónico.**

Calizas, a veces oolíticas y calizas dolomíticas. Presencia de miliólidos.

- **52 - 597 m: FORMACIONES PULPIS – SOT DE CHERA: Oxfordiense-Kimmeridgiense.**

Calizas, calizas dolomíticas y dolomías. Se observa desarrollo kárstico en tramos dolomíticos entre 95 m -115m y de 125 m a 135 m con pérdidas parciales de lodo.

- **597 – 616 m: FORMACIÓN YÁTOVA: Oxfordiense.**

Calizas margosas y arcillas. En esta unidad no se aprecia desarrollo kárstico.

- **616 – 688 m: FORMACIÓN CHELVA. Toarciense – Oxfordiense.**

+ **MIEMBRO LA TOSSA: Calloviense 616 m a 669 m.**

Dolomía calcárea con intercalaciones de calizas, a veces bioclásticas.

+ **MIEMBRO CALIZAS DE CASINOS: (Aalenense-Calloviense) 669 m a 688 m:** Calizas y dolomías margosas. Desarrollo kárstico con pérdidas totales entre 670 m y 680 m.

- **688 – 707 m: FORMACIÓN MARGAS Y CALIZAS DEL TURMIEL: Toarciense**

Alternancia de calizas y calizas margosas, con intraclastos, a veces dolomitizadas. Se aprecian evidencias de desarrollo kárstico a muro de la unidad (pérdidas totales a desde 695 m a 705 m).

- **707 – 731 m: FORMACIÓN CALIZAS BIOCLÁSTICAS DE BARAHONA: Pliesbachiense superior.**

Dolomías microcristalinas. Desarrollo kárstico (pérdidas totales a desde 720 m a 726 m).

- **731 - 793 m: FORMACIÓN MARGAS GRISES DE CERRO DEL PEZ: Sinemuriense-Pliesbachiense superior.**

Dolomías y calizas biclásticas dolomíticas, a veces arcillosas.

- **793 - 837 m: FORMACIÓN CUEVAS LABRADAS: Sinemuriense-Pliesbachiense.**

Calizas dolomíticas y dolomías y calizas que se hacen arcillosas hacia la base.

- **837 – 943 m: FORMACIÓN CORTES DE TAJUÑA: Retiense-Hettangiense.**

Dolomías con presencia de arcillas en zonas karstificadas entre 907 m y 911 m. Aspecto carniolar. Intervalos brechoides de elementos dolomíticos. Pérdidas totales de aire a partir de 882 m.

- **943 – 970 m: Fm IMON: Retiense.**

Dolomías calcáreas cristalinas.

- **970 - 1200 m: KEUPER.**

Arcillas, anhidritas y halita. Cuarzos bipiramidales.

- **1200 - 1378 m: MUSCHELKALK SUPERIOR (M-III).**

Dolomía arcillosa a arcilla dolomítica hojosa, calizas y margas. Juntas de arcillas carbonosas.

Las pruebas de producción realizadas (ver informe final de sondeo) indican permeabilidad casi nula. Aunque aparecieron pérdidas parciales entre 1237 m -1242 m y entre 1318 m a 1373 m, en zonas de fracturación.

- 1378 - 2592 m (TD): MUSCHELKALK MEDIO (M-II).

Alternancias de sal, anhidrita y arcillas.

Cálculos de porosidad en el sondeo BOBALAR-2

El sondeo Bobalar-2 alcanzó una profundidad total de 2594.6 m.

Las únicas diagráfias consideradas útiles para los datos investigados, disponibles son Laterolog desde 550 m hasta 1750 m y Microlaterolog de 1150 a 1377 m. También fue registrada la sonda Neutron pero en unidades CPS, unidades no validas para cálculos, como ya se comentó para el sondeo Bobalar 1.

Los valores de porosidad en el sondeo se mantienen entre 900 y 1050 CPS desde el inicio del sondeo hasta 500 m.

De 500 m a 637 m, los valores se incrementan levemente, y desde 637 m hasta 730 m se produce la mayor subida de la curva de porosidad, en esta zona se apreciaron pérdidas totales del aire con el que se perforó y por tanto no hubo recuperación de ripio.

Desde 730 m a 825 m los valores se mantienen en torno a las 340 CPS y a partir de 825 la porosidad registrada aumenta hasta las 200 CPS.

La resistividad medida entre 550 m y 630 m oscila entre 100 y 1500 Ohm.m, de 630 m a 835 m se produce un aumento y alcanza a valores comprendidos entre 500 y 5000 Ohm.m.

De 835 m a 975 m la resistividad baja por debajo de 500 Ohm.m (excepto datos puntuales en picos) y desde 975 hasta 1090 m la resistividad baja de 20 Ohm.m.

De 1100 m a 1380 m la curva oscila entre 0 y 2000 m, desde esta cota hasta 1750 m se mantiene por debajo de 20 Ohm.m.

Los datos de salinidad en las dos pruebas de producción (DST) realizadas fueron:

- A 1221.6-1244 m se obtuvo lodo y agua con una salinidad de 242 g/l, lo que equivale a 241.971 ppm.
- A 1323.3-2354.5 m, que dio como resultado lodo y agua con una salinidad del agua de 230 g/l (229.973 ppm)

En el Jurásico se desconoce el tipo de agua presente, la estimación de porosidad a partir del Neutrón sube desde el Malm hacia el Dogger, debido su mayor contenido en arcillas. Las pérdidas totales presentes en estas series se deben a karstificación. El aumento en resistividad puede ser debido a un aumento en la porosidad y a la presencia de agua con salinidad mas baja.

Para las series Muschelkalk y el Keuper (970 m – 2591 m) se identifica agua de formación salada, por las pruebas de producción (más de 200 g/l).

La resistividad oscila en el Keuper y en el MI al haber presencia de intercalaciones de arcilla, anhidrita, halita, y calizas, mientras que para el MII se mantiene en valores bajos al estar constituido fundamentalmente por sal, anhidrita y arcilla.

III.5. CORRELACION DE SONDEOS (Anexos 9 y 10)

Se han realizado dos correlaciones de sondeos : una estratigráfica, referenciada a la horizontal correspondiente al techo del Dogger (Anexo 9), y otra correlación estructural, referenciada al nivel del mar, que integra los sondeos Bobalar 1, Maestrazgo 1 y Salsadella 1.

En estas correlaciones se observa la continuidad de las distintas formaciones consideradas y destaca el incremento de potencia de la serie Malm en el sondeo Maestrazgo 1 (en situación de surco), con respecto al Bobalar 1 (en situación de alto), lo que data la etapa de principal generación de depocentros y estructuración regional, que continua durante el Neocomiense, con funcionamiento de fallas lístricas, (la etapa Rift), que posteriormente pudieron rejugarse como inversas, durante la Orogenia Alpina y que condicionan la geometría y disposición actual de los acuíferos regionales.

Según se puede deducir de la correlación estratigráfica, la serie del Lías y Dogger, presenta un carácter isópaco en los sondeos, de lo que se deduce que su depósito se ha producido en una etapa de mayor calma tectónica (pre-rift) anterior al desarrollo de los depocentros en el Neocomiense, que generaron el depósito y potencia diferencial de dichas series de carácter post-rift.

Esta correlación también marca la complicación tectónica en el nivel de despegue triásico, en las que se observa desaparición de serie triásica debido al funcionamiento de fallas, especialmente en los sondeos Maestrazgo 1 y Salsadella 1.

IV.- SÍNTESIS GEOLÓGICA

La zona de estudio para la Unidad Hidrogeológica 08.07 "El Maestrazgo", incluida en la Cuenca Hidrográfica del Júcar, está caracterizada cartográficamente por afloramientos del Cretácico inferior y del Jurásico (Figura 2) e incluida en la denominada "Zona de Enlace" de interferencia o conexión entre la Cadena Costera Catalana (de dirección NE-SO) con la Cadena Ibérica (de dirección NO-SE) ("Estudi de la Dolomitització del Juràssic Superior-Cretaci Inferior de la Cadena Ibèrica Oriental i la Cadena Costero Catalana: Relació amb la Segona Etapa de Rift Mesozoica". Judit Nadal i Feixas. Facultat de Geologia Dpto. de Geoquímica, Universidad de Barcelona, 2001). Ambas cadenas intracratónicas son el resultado de la inversión tectónica paleógena del rift mesozoico ibérico.

El registro sedimentario ligado al rift mesozoico se desarrolla como respuesta a las dos etapas de evolución de dicho rift separadas por la fase Inter-rift jurásica:

- la extensión del Pérmico superior – Hettangiense (Figura 2) que controla importantes acumulaciones siliciclásticas del Buntsandstein, y los carbonatos arcillas y evaporitas del Muschelkalk y Keuper, en una cuenca limitada por fallas normales de gran ángulo.
- y la extensión Jurásico superior-Neocomiense (muro del Barremiense) (Figura 2), periodo durante el que se individualiza la cuenca del Maestrazgo según 4 zonas de falla principales (corresponden a las denominadas como zonas de falla del Turmell, zona de falla de Cedrillas, zona de falla de la Muela de Montalbán- Herbers-Llabeira, y zona de falla de Miravete).

Durante la inversión tectónica de la cuenca en la reactivación paleógena, las fallas preexistentes desarrollan una serie de cabalgamientos sobre niveles de despegue triásicos (MII y Keuper) (Figura 2), que producen un acortamiento cortical calculado del orden de 15 km.

El rasgo más significativo del área viene generado por su compartimentación en estas cuencas menores durante la etapa rift Jurásico superior-Cretácico inferior, de

modo que se produce la generación de un sistema de subcuencas subsidentes, controladas por un sistema de fallas normales de dirección E-O y buzamiento S, que configuran regionalmente el depósito Neocomiense (Berriasiense – Barremiense) mediante morfologías de aumento de potencia de capas hacia el N.

La acumulación de estos materiales en una etapa "sinrift", pueden llegar a alcanzar más de 2000 m de potencia en el surco del borde de la Falla del Turmell (sondeo Maestrazgo 1), surco en el que se reconoce y caracteriza la siguiente sucesión estratigráfica:

A) Depósitos de la segunda etapa del rift mesozoico

- **Formación Artolas** (Barremiense terminal-Hauteriviense): representada por facies de calizas (con desarrollo kárstico), y presencia de calizas margosas (no karstificadas) hacia la base. Esta formación alcanza 385 m de potencia en el sondeo Maestrazgo 1, teniendo en cuenta que no ha cortado su techo, ya que el sondeo inicia su perforación en materiales de dicha formación, por lo que su potencia sería igual o mayor a 385 m.

Sobre esta formación y separada por el horizonte sísmico **H6** (Figura 2) se encuentra la serie Albense-Aptiense (cambio de facies entre las formaciones Forcall, Xert y Morella).

- **Fm Llácova y equivalente Fm Gaita** (Valanginiense terminal-Hauteriviense): reconocida en el sondeo Maestrazgo 1 con 163 m de potencia, compuesta por calizas y calizas margosas. Las facies calizas llegan a alcanzar valores de porosidad del 14 %, según datos del informe final de sondeo.

- **Fm Bastida** (Valanginiense): Calizas y calizas dolomíticas a la base con desarrollo kárstico. Alcanza 127 m de potencia en el sondeo Maestrazgo 1. Esta formación incluye el horizonte sísmico **H5** (Figura 2).

- **Fm Polacos** (Berriasiense): Calizas con intercalaciones arcillosas y dolomías a la base. En el sondeo Maestrazgo 1 presenta desarrollo kárstico y una potencia de 167 m.

- **Fm Bobalar** (Tithónico-Berriasiense). Atravesada parcialmente en el sondeo Bobalar 1 y en su totalidad con 152 m en el Maestrazgo 1, Maestrazgo 2 y en el sondeo Mirambell 1. Compuesta por litologías dolomíticas y calizas de origen de llanura mareal y bancos oolíticos y bioclásticos. Porosidad de 8% en el sondeo Maestrazgo 1.

- **Fm Ascla – Ritmitas de Loriguilla** (Kinmeridgiense superior-Tithónico). Representada por calizas margosas y dolomíticas y margas anóxicas en zonas subsidentes. Los tramos calizos más puros se encuentran karstificados en el sondeo Maestrazgo 1. Está reconocida, además de en este sondeo (con 111 m), en los sondeos Maestrazgo 2, Bobalar 1, Bobalar 2, y Mirambell 1. A techo de la formación queda situado el horizonte sísmico de referencia **H4'** (Figura 2), que lo separa de la formación Bobalar.

- Fm **Pulpis** y equivalente basal margoso (**Fm Sot de Chera**) (Oxfordiense-Kinmeridgiense-Tithónico basal). Potente serie caliza-dolomítica y margosa (899 m en el sondeo Maestrazgo 1), aunque con potencia diferencial menor en el resto de los sondeos, por su posición relativa en la cuenca. Presencia de facies micríticas y bioconstrucciones de esponjas en rampa homoclinal (atravesada en los sondeos Maestrazgo 1 y 2, Salsadella 1, Bobalar 1 y 2 y Mirambell 1).

En esta formación se aprecia la mayor actividad de crecimiento diferencial en relación a las fallas distensivas que se desarrollan durante la segunda etapa de Rifting (Malm-Neocomiense).

En los sondeos Maestrazgo 1 y Salsadella 1 presenta tramos karstificados, porosidades medias del 7%, permeabilidad alta y contenido en agua dulce.

B) Depósitos de la etapa inter- rift mesozoico

- **Fm Yátova** (Oxfordiense). Con una potencia entre 23 y 33 m en los 6 sondeos de la zona, cuya potencia uniforme parece indicar que a partir de su depósito se desencadena realmente el inicio del importante rifting del Jurásico superior.

Litológicamente está compuesta por calizas margosas y margas. Presenta tramos con desarrollo kárstico en el sondeo Maestrazgo 1.

- **Fm Chelva** (Dogger). Depositado en la fase interrift. En ella se pueden diferenciar dos miembros correlacionable petrofísicamente en los sondeos del área:

+ Miembro La Tossa: con mayor contenido dolomítico y con desarrollo kárstico (sondeos Maestrazgo 1 y Salsadella 1). Su litología además de dolomítica contiene finas pasadas de calizas margosas y una potencia de 65 m en el sondeo Maestrazgo 1.

+ Miembro Calizas de Casinos: con una potencia de 119 m en el sondeo Maestrazgo 1 y una litología de calizas y calizas margosas con intercalaciones de margas y dolomías. Su carácter mas margoso parece inhibir el desarrollo kárstico en el sondeo Maestrazgo 1, mientras que si se observa desarrollo kárstico en el sondeo Salsadella 1.

El techo del Dogger-base del Oxfordiense (correspondiente al límite entre las formaciones Chelva y Yátova) corresponde al horizonte sísmico **H4** (Figura 2) definido y seguido en la interpretación sísmica.

- **Fm Margas y Calizas del Turmiel** (Toarciense). La serie del Lías presenta esta formación, a su techo, con 33 m de potencia en el sondeo Maestrazgo 1, y una litología de calizas, margas y dolomías y que está presente en el resto de los sondeos estudiados en la zona. En el sondeo Maestrazgo 1 se calcula una porosidad media del 7% y una estimación de permeabilidad alta con presencia de agua dulce. Se interpretan zonas kársticas en el sondeo Salsadella 1.

- **Fm Calizas Bioclásticas de Barahona** (Pliesbaquiense Superior). Con litología mayoritaria caliza con presencia minoritaria de margas y dolomías. Está identificada con potencias en torno a 25 m y correlacionada en todos los sondeos estudiados en

el área. En el sondeo Maestrazgo 1 presenta porosidades medias del 8 % y zonas con desarrollo kárstico.

- **Fm Margas Grises de Cerro del Pez** (Sinemuriense - Pliesbaquiense). Con litología de margas, calizas y dolomías. Está identificada con potencias entre 23 m (sondeo Salsadella 1 - 68 m sondeo Bobalar 1) y correlacionada en todos los sondeos estudiados en el área. En los sondeos Maestrazgo 1 y Salsadella 1 presenta zonas desarrollo kárstico en sus tramos más carbonáticos.

- **Fm Cuevas Labradas** (Sinemuriense - Pliesbaquiense). Con litología de dolomías y calizas dolomíticas y poca presencia de margas. Está identificada con potencias entre 40 m (sondeo Bobalar 1) y 82 m (sondeo Maestrazgo 1) y correlacionada en todos los sondeos estudiados en el área. En los sondeos Maestrazgo 1 y Salsadella 1 presenta importante desarrollo kárstico y porosidades medias entre el 8 y el 11 % en el sondeo. Maestrazgo 1, en el que se recuperó agua con 1320 ppm de salinidad (valor próximo al límite de agua dulce-salobre).

- **Fm Cortes de Tajuña** (Rethiense- Hettangiense). Con litología de dolomías, dolomías arcillosas, arcillas, intercalaciones de anhidritas y brechas. Está identificada con potencias entre algo superior a 100 m y correlacionada en todos los sondeos estudiados en el área. En el sondeo Maestrazgo 1 presenta porosidades medias de los tramos carbonáticos en torno al 14 % y zonas con desarrollo kárstico, también presentes en el sondeo Salsadella 1.

Constituye la base del acuífero regional jurásico en la zona, ya que según los datos de sondeo, esta formación y la serie infrayacente contienen aguas de carácter salino. Ello indicaría su desconexión con las aguas de infiltración superficial (agua fósil), y la actuación de las facies anhidríticas de esta formación como barrera de permeabilidad o sello para la serie infrayacente.

C) Depósitos de la primera etapa del rift mesozoico (Pérmico superior -Hettangiense

- **Fm Imón** (Rethiense). La serie del Triásico comienza en su techo (próximo al horizonte sísmico **H3**) con la Fm Imón, presente en los sondeos Bobalar 1 y 2, Maestrazgo 2 y Mirambel 1 con potencias entre 27 y 40 m y porosidad media del 13 % en el sondeo Bobalar 1, y litologías dolomíticas cristalinas con venas de calcita. En los sondeos Maestrazgo 1 y Salsadella 1 se considera ausente por estar la parte superior de la serie triásica cortada por falla.

El carácter de las aguas de formación es salino.

- **Keuper**. La serie del Triásico superior se completa con esta formación arcilloso-anhidrítica-salina, con presencia característica de cuarzos bipiramidales ("Jacintos de Compostela") y que constituyen, junto al Muschelkalk Medio (MII) los niveles de despegue estructurales en la zona.

Esta serie está presente en los sondeos Bobalar 1 y 2, Maestrazgo 2 y Mirambel 1 con potencias entre 230 m (sondeo Bobalar 2) y 279 m en el sondeo Mirambel 1. En los sondeos Maestrazgo 1 y Salsadella 1, al igual que la Fm Imón, la serie Keuper no está presente por estar toda la serie triásica superior ausente por falla.

Hidrogeológicamente, esta formación tiene características de sello de impermeabilidad, y se estima que constituye la base de los acuíferos de agua dulce-salobre, de interés en la zona.

Próximo a su base se encuentra el horizonte sísmico seguido y denominado para el Proyecto como **H2** (Figura 2), que a su vez se sitúa a techo de la formación Muschelkalk superior (M III).

- **Muschelkalk Superior (MIII)**.

Su litología está compuesta por dolomías arcillosas, arcillas dolomíticas con textura hojosa, calizas y margas, a veces presenta juntas de arcillas carbonosas. Esta serie está presente en los sondeos Bobalar 1 y 2, Maestrazgo 2 y Mirambel 1 con potencias entre 134 m (sondeo Maestrazgo 2) y 178 m en el sondeo Bobalar 2,

potencias diferenciales en relación a su posición estructural, lo que podría sugerir movimientos de inicio de etapa halocinética (almohadilla salina). En los sondeos Maestrazgo 1 y Salsadella 1, al igual que la fm Imón, y el Keuper, la formación MIII está ausente por falla.

Porosidades de los carbonatos se calcula entre el 1 al 3% en el sondeo Bobalar 1, que además en su conjunto son poco permeables salvo en zonas de fracturación.

Salinidad del agua calculada, como ya se citó en el apartado de sondeos, es de 100 gr/l (salada).

- Muschelkalk Medio (MII).

Está caracterizado por una serie arcillosa-evaporítica (salina y anhidrítica) con facies similares al Keuper.

Se encuentra presente en todos los sondeos de la zona excepto en el sondeo Salsadella 1 debido a su posición estructural y a la falla que corta y hace desaparecer parcialmente la serie triásica.

Esta serie alcanza su mayor potencia en el alto estructural de Bobalar, en donde se perforaron los sondeos Bobalar 1 y Bobalar 2, que atravesaron el techo de la serie del M II, sin llegar a alcanzar su base tras atravesar 1.214 m de serie M II en el sondeo Bobalar 2.

Constituye, junto a la serie Keuper (de que solo está separado estratigráficamente por los carbonatos del M III, y al que a veces se interpreta en conexión estructural) un importante nivel de despegue plástico, en el que alcanzan su mayor vergencia y enraízan las estructuras regionales y que caracterizan este dominio.

- Muschelkalk Inferior (MI).

Ausente en el sondeo Maestrazgo 1 por falla y atravesado por los sondeos Salsadella 1, Mirambel 1, y Maestrazgo 2, con potencias entre 210 m (Maestrazgo 2) y 91 m en el sondeo Mirambel 1. Los sondeos Bobalar no llegaron a alcanzarlo aunque se considera presente bajo la estructura.

Su litología es similar al M III y está compuesto por alternancias de calizas, a veces dolomíticas, o arcillosas y dolomías. Presenta algunas intercalaciones anhidríticas.

- **Buntsandstein**

Cortado en todos los sondeos del área salvo en los sondeos Bobalar 1 y 2 que no llegan a alcanzar esta serie, pero bajo los cuales esta serie se interpreta presente a más profundidad, según la interpretación sísmica.

Se caracteriza por una secuencia detrítica positiva grano decreciente que culmina a techo en facies Röt (arcillas roja dolomíticas y micáceas).

El resto de la serie está caracterizado por areniscas y limolitas rojas oscuras y conglomerados mas frecuentes a la base.

Entre la formación Röt y el resto de la serie siliciclástica del Buntsandstein, se ha seguido el horizonte sísmico **H1** (Figura 2).

En el sondeo Maestrazgo 1 se produjeron pérdidas totales en zonas fracturadas y la porosidad en este sondeo varía entre el 7 y el 16 %. La porosidad calculada de las areniscas en este tramo varía entre el 7 % al 16 %.

En sondeo es de difícil separación de la serie del pérmico infrayacente, por similitud de facies y su potencia es de 73 m, aunque en sondeos próximos que también lo atraviesan, su potencia es de 2168 m en el Mirambel 1 y 196 m en el Salsadella 1.

D) Basamento Paleozoico

En los sondeos que alcanzan este nivel (solo los sondeos Bobalar 1 y 2 no lo alcanzan) e infrayaciendo al Buntsandstein, se encuentran los depósitos siliciclásticos del Pérmico, a veces con presencia de carbón (Permo-Estefaniense indiferenciado en el sondeo Maestrazgo 1), con valores calculados de porosidad que no superan el 3,5 % en el sondeo Maestrazgo 1.

En la interpretación sísmica puede apreciarse un comportamiento tectónico solidario del Pérmico con el conjunto Buntsandstein Muschelkalk I, bajo el nivel de despegue constituido por el Muschelkalk medio (M II).

V. INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA Y GEOFÍSICA DE PERFILES SÍSMICOS

La interpretación de los datos geológicos y geofísicos procedentes de la exploración de hidrocarburos (fundamentalmente sísmica y sondeos) ha complementado la caracterización estratigráfica y estructural de la zona y contribuido a la definición de los rasgos geológicos del subsuelo.

El reflector sísmico correspondiente al techo del Triásico ha sido considerado como horizonte representativo, a cartografiar en los mapas de isobatas, por constituir este horizonte la base del acuífero jurásico-cretácico regional de agua dulce. Su seguimiento areal, que marca las zonas de surco y alto para la base de dicho acuífero, está condicionado por el funcionamiento de las fallas que enraízan en el nivel de despegue Muschelkalk medio (MII) y que, con su movimiento de bloques, pueden condicionar lateralmente la continuidad de los acuíferos, que pueden ser interrumpidos por los planos de dichas fallas.

Los anexos 21 y 22, corresponden a mapas de este horizonte, a escala 1:50.000, individualizados para dos áreas (área de Bobalar-Morella y área de Salsadella) en las que se concentra el mallado sísmico disponible.

Así mismo ha sido realizado un mapa a escala 1:75.000 que integra y conecta ambas áreas, con criterios geológicos y estructurales regionales en la zona de vacío de mallado sísmico, pero que consigue integrar coherentemente la información profunda de cada zona.

La información sísmica de cada área esta referida a un plano de referencia distinto, en base a los datos de adquisición de cada una de las campañas sísmicas (1000 m en el área de Bobalar – campañas sísmicas CT87 y CT-88, y 400 m para el área de Salsadella- campaña SM).

Para cada zona se ha realizado una conversión de los datos de tiempos obtenidos de la interpretación sísmica, utilizándose una velocidad de cálculo obtenida a partir

de los datos de los sondeos y de las velocidades dinámicas de las propias líneas sísmicas y ajustadas a su vez al DP de calculo correspondiente (4750 m/s en el área de Bobalar, y 4580 m/s para el área de Salsadella).

A partir del mapa de isocronas para cada área se realizó su correspondiente conversión a profundidades (Anexos 21 a 23), integrándose posteriormente los resultados geométricos en un único mapa referido a nivel del mar como un plano de referencia común.

En este mapa se aprecia la progresiva profundización de la cuenca jurásica hacia el E, de modo que el techo del Trías llega a alcanzar profundidades superiores a 3000 m desde un DP 0 m.n.m. (próximo a 2300 m. b.n.m en Maestrazgo 1), mientras que en la zona W las profundidades son mucho mas someras (unos 300 m.s.n.m en la estructura de Bobalar). Hay que tener en cuenta que los datos de profundidad en los sondeos (salvo para el sondeo Maestrazgo 1 perforado en una zona de surco jurásico) están en relación a objetivos exploratorios en altos estructurales (techo de Trías superior a 100 m s.n.m. en el sondeo Salsadella 1), aunque los mapas reflejan claramente la profundización de la serie objetivo acuífero hacia el E, y su compartimentación en surcos generados por fallas que posiblemente condicionaran el régimen hidrodinámico de los acuíferos regionales.

La disposición del mallado de perfiles sísmicos y de los sondeos existentes ha permitido por tanto individualizar 3 áreas para el estudio de la zona. Estas áreas corresponden a tres dominios estructurales (Anexo 23), de los que podemos destacar los siguientes aspectos:

V.1. Área de Bobalar-Morella

Abarcada por las hojas geológicas 544 Forcall, 545 Morella y 570 Albocacer, corresponde al dominio tabular central de la cuenca del Maestrazgo (Anexo 21).

Para la interpretación de la subcuenca de Morella se ha dispuesto de información sísmica de buena calidad con un mallado intenso y regular de perfiles de las campañas CT-87 y CT-88. Esta campaña se ha interpretado con los datos de los sondeos Bobalar 1 y 2 y con la integración de la información cartográfica de superficie.

La buena calidad de la imagen sísmica ha permitido definir todos los horizontes de estudio:

- Horizonte próximo a la base de la serie Triásica (H1)
- Horizonte próximo a la base del Keuper (H2)
- Horizonte próximo a la base de la serie Jurasica (H3)
- Horizonte próximo al techo del Dogger (H4)
- Horizonte próximo a la base de la Fm Bobalar (Transito Jurasico-Cretácico) (H4')
- Horizonte intra-Valanginiense incluido en la formación Bastida (H5)
- Horizonte próximo al límite Barremense – Aptense (H6)

Según se puede apreciar en los perfiles sísmicos y correspondientes cortes, la serie Jurásica y Cretácica esta afectada por una intensa fracturación principalmente de origen distensivo y que presenta un mayor desarrollo en la serie Jurasica superior.

Se interpreta también en los márgenes del dominio de estudio de esta campaña (CT 87 y CT 88) el desarrollo de estructuras compresivas (estructura de Bobalar al oeste, falla del Turmel al Sur, y las estructuras de Morella de vergencia Norte).

La estructura de Bobalar muestra una clara vergencia al Este, y al igual que el resto de la serie Jurasico-Cretácico despega a favor de los niveles plásticos del Muschelkalk medio. La mayoría de la fallas interpretadas parecen enraizar en la potente serie evaporítica del Muschelkalk II, no detectándose continuidad de estas fallas al basamento Permo-Triásico.

La interpretación de la falla del Turmel como estructura compresiva hacia el Sur y sureste no se deduce claramente de la información sísmica, pues los perfiles al alcanzarla no presentan suficiente cobertura al ser los inicios o finales de dichos perfiles. Sin embargo el crecimiento de la serie evaporítica infrayacente y el ascenso de la serie Jurasico-Cretácico con pequeñas fallas compresivas con vergencia Sur, permite interpretar la falla del Turmel como posible falla inversa vergente sur (Anexo 24).

La campaña MA presenta, dada su baja cobertura (1200%) y dispositivo convencional con separación de PT (120 m) una resolución media a baja, pero

Las campañas CT, realizadas con adquisición "Pop Shot" (punto de tiro múltiple con varios pozos a escasa profundidad y limitada carga de dinamita), presentan mejor resolución, siendo mejor la campaña CT-88 disparada con separación de PT 25 m, que la CT-87 disparada con separación de 75 m.

La buena resolución de estos perfiles permite una correcta interpretación de la serie Jurásico-Cretácico en este sector del Maestrazgo dado el buen mallado sísmico existente y el control cartográfico que apoya la interpretación de estos perfiles.

Los perfiles sísmicos utilizados para esta interpretación han sido principalmente los localizados entre la estructura de Bobalar y la de Morella:

- Campaña CT 87: 01, 02 y 05.
- Campaña CT-88: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 22, 25, 26,27,28,29,30, 31 y 32.
- Campaña MA: 4, 6, 11, 19,20, y 21.

Se han seguido para este estudio varios horizontes sísmicos, calados a partir del sondeo Mirambel-1 ("CONSIDERACIONES EXPLORATORIAS SOBRE LA INVESTIGACIÓN DE FORMACIONES Y ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS DE INTERÉS PARA ALMACENAMIENTO DE GAS EN LA HOJA 48, VINAROS- SECTOR ORIENTAL DEL MAESTRAZGO-. ITGE 1995), y llevados hasta el área de Bobalar a través del perfil CT-88-22. Para el seguimiento de horizontes al Este de la estructura de Bobalar ha sido necesario el apoyo a la interpretación del control cartográfico a los reflectores más superficiales, próximos al techo de la serie Jurásica y base del Cretácico.

En general los horizontes seleccionados presentan un buen carácter sísmico para ser interpretados a lo largo de los perfiles de las campañas CT (Figura 3) (Anexos 11 a 14).

Uno de los objetivos de la interpretación sísmica ha consistido en el reconocimiento de fallas que afectaran a los niveles acuíferos jurásicos, tanto en la estructura interna del

anticlinal, como de otra red de fracturas previas a la compresión alpina. La buena resolución sísmica permite definir una red de fracturas distensivas previa a la compresión alpina, de dirección aproximada NW-SE, afectando fundamentalmente a la serie Jurásica, y con menores saltos a la serie Cretácica.

Los posibles cabalgamientos o fallas inversas que condicionan la geometría de las estructuras compresivas de Bobalar, Morella y Turmel son interpretados, a pesar de la escasa resolución de los perfiles sísmicos, al reconocerse una estructuración interna de estos anticlinales en base a vergencias, despegues y apilamiento de la serie estratigráfica Jurasico-Cretácica.

La falta de registro de velocidad en los sondeos Bobalar ha hecho necesario contrastar los datos procedentes de las velocidades de intervalo obtenidas del análisis del log acústico (sonic log) del sondeo Maestrazgo 1, (que ofrece datos de 5400 m/s para el intervalo Lías inferior a Cretácico Inferior) con las velocidades dinámicas de los perfiles sísmicos de las campañas de esta zona.

Finalmente, para la conversión del mapa de isocronas a isobatas (Anexo 21) ha sido utilizada una velocidad media de 4750 m/s desde el D.P. 1000 m hasta el techo del Triásico. Esta velocidad es similar a la propuesta para los sondeos Bobalar 1 y 2 para el calado de este horizonte, y también similar a las velocidades dinámicas de las secciones de la campaña MA, CT87 y CT88 para dicho reflector y para un nivel de referencia de cálculo (DP) de 1000 m snm.

V.2. Área de Salsadella- Vinaroz

Se extiende en el subsuelo abarcado por las hojas geológicas 546 Ulldecona, 570 Albocacer y 571 Vinaroz, en donde se desarrolla, como la extensión meridional de la cadena costero-catalana, un dominio morfoestructural escalonado de horst de materiales mesozoicos y grabens rellenos de material Neógeno.

En esta subcuenca se dispone de información sísmica de media a baja calidad con un mallado regular con perfiles de la campaña SM referidos a un datum de 400 m sobre el nivel del mar. La calidad de la sísmica disponible solo ha permitido el seguimiento del horizonte base del Lías y la base de la serie cretácica (Figuras 4 y 5).

La interpretación de los perfiles sísmicos en este área ha permitido, al menos, la elaboración de un mapa de isocronas con mejor definición que los existentes en trabajos previos, respondiendo la geometría del trazado de isolineas a un modelo principal de fallas distensivas de orientación N-S, según se puede apreciar en los perfiles sísmicos y en los correspondientes cortes geológicos (Anexos 15 a 20 y 24).

El rasgo de esta subcuenca más claramente apreciable en el mapa de isobatas del techo del Triásico (Anexo 22) es el desarrollo de grandes fallas lítricas de dirección N-S, con hundimiento al Oeste, originadas en la etapa distensiva neógena, que generan grabens de depósito mioceno-plioceno. También se reconoce una estructuración previa en escalones o pliegues de orientación E-O y NE-SO de componente compresiva de la etapa alpina.

V. 3. Áreas de Albocacer- Cuevas de Vinroma-Torreblanca

Se desarrollan en el área de estudio abarcada por las hojas geológicas 593 y 594. Dada la mala calidad de los perfiles sísmicos, su interpretación se ha realizado a partir del análisis y elaboración de los cortes geológicos apoyados en el modelo estructural definido en este estudio, en el sector septentrional del área de estudio. No ha podido ser definido ningún reflector sísmico significativo ni permitido la caracterización de los rasgos estructurales en subsuelo a partir de la deficiente imagen sísmica obtenida.

Del corte elaborado en este sector se deduce la importancia y continuidad de la falla de Salsadella, que conectaría hacia el sur con la unidad de Paleozoico-Triásico aflorante en la sierra de las Contiendas, a partir de información cartográfica y del modelo estructural propuesto (Anexo 24).

Se observa en ocasiones que el desarrollo de estas fallas lítricas presentan un claro relevo en sus fallas antitéticas, tomando estas fallas a lo largo de kilómetros la relevancia en el desarrollo y límite de las cubetas neógenas.

También se puede observar como la continuidad de la falla de Tirig genera entre esta y la falla lítrica de Salsadella un gran hundimiento de toda la serie Jurásico-Cretácica en este sector, pudiendo estar esta falla condicionada a un accidente profundo del sustrato o basamento Paleozoico-Triásico inferior.

VI. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES HIDROGEOLÓGICAS DE CARÁCTER PUNTUAL

El proyecto HIPROMA, en el que se incluye el presente estudio, tiene como objetivo el establecimiento del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero profundo del Maestrazgo y la estimación de sus recursos hídricos.

En este contexto exploratorio, la interpretación sísmica, junto a la correlación de sondeos, ha permitido interpretar los rasgos estructurales de la zona en subsuelo, de modo que puede observarse el enraizamiento de las estructuras sobre los niveles de despegue constituidos por las facies arcillo-evaporíticas del Keuper y del Muschelkalk II que separan dos estilos tectónicos y que compartimentan la cuenca a modo de zonas estructurales de altos y surcos en los que se desarrollan series jurásico-cretácicas de carbonatos permeables con agua dulce sobre las series arcilloso evaporíticas impermeables del Lias inferior/Triásico, con agua salada, que condicionan el modelo hidrogeológico del área (Figuras 6 , 7 y 8).

Por un lado, la cobertera afectada inicialmente por el "rifting" jurásico-cretácico, posteriormente por la etapa alpina, en la que se observa el rejuego compresivo sobre la serie jurásico-cretácica, y finalmente afectada por la distensión neógena. En esta unidad de cobertera se desarrollan importantes estructuras vergentes N-S y E-O (Bobalar, Turmell, Canello Roig , Cervera del Maestre, Tirig etc.) y especialmente en el dominio más meridional del área de estudio un gran desarrollo de fallas lístricas.

Por otro lado se desarrolla la unidad de basamento, constituida por unidades del Muschelkalk I, Buntsandstein y Paleozoico, cuya disposición en bloques compartimentados afecta tanto al rifting Triásico-Jurásico, como a la etapa distensiva del Neógeno. La sísmica disponible en el área de estudio no permite una correcta definición de la geometría de este zócalo o basamento. Además, las características hidrogeológicas de este basamento como acuífero confinado de alta salinidad no le otorgan interés como objetivo de estudio en este Proyecto.

En conjunto la serie Jurásico-Cretácico representa un acuífero regional, por desarrollo kárstico, con presencia de agua dulce hasta la base del Jurásico. El nivel de despegue Keuper constituye, junto a las facies anhidríticas de la fm. Cortes de Tajuña, el nivel impermeable basal del desarrollo kárstico del Mesozoico, hasta el cual se produjeron frecuentes pérdidas de lodo durante la perforación de los sondeos de la zona y actúa a modo de barrera de separación de aguas de naturaleza dulce y salobre-salina.

La interpretación geológico-geofísica pone de manifiesto un esquema estructural (Figura 9) en el que se desarrollan importantes fallas lítricas, con rejuego en algunos casos de carácter compresivo, que pueden representar importantes barreras hidrogeológicas, y de las que debemos destacar la falla lítrica de Salsadella, cuya extensión hacia el sur alcanzaría los afloramientos de unidades basales (Triásico Inferior-Paleozoico) de la sierra de las Contiendas (Villafames.Benicasim), y la falla de Tirig-Adzaneta, con salto de 500 a 1000 m.

El desarrollo de fallas antitéticas asociadas a estas fallas principales, la geometría en arco de las mismas, el relevo a nuevas fallas sintéticas y la existencia de fallas compresivas de orientación E-O hace que el nivel de compartimentación de estos acuíferos requiera un control exhaustivo en la interpretación geométrica de las líneas de flujo de las aguas subterráneas en este área.

Así pues, la interpretación sísmica ha contribuido a la caracterización de la potencial conexión hidráulica de los acuíferos desde las zonas de infiltración superficial hasta sus zonas de confinamiento, mediante la caracterización estructural.

La continuidad de esta estructuración hacia los sectores próximos a la costa requeriría de la revisión de la información sísmica situada en el offshore de Castellón (campañas sísmicas marinas), con el fin de conectar el modelo estructural propuesto hacia el Este, en el dominio costero, con el fin de disponer de datos estructurales para el modelo hidrogeológico del área.

Como rasgos hidrogeológicos significativos, también se ha interpretado el desarrollo kárstico, según ha sido establecido en estudios previos, que las facies carbonáticas del tránsito Jurásico-Cretácico (formación Bobalar y equivalentes como la fm. Talaies) se dolomitizaron sincrónicamente a la exposición y erosión de los altos paleogeográficos durante el Berriasiense-terminal-Valanginiense. ("Estudi de la Dolomitització del Juràssic Superior-Cretaci Inferior de la Cadena Ibèrica Oriental i la Cadena Costera Catalana: Relació amb la Segona Etapa de Rift Mesozoica". Judit Nadal i Feixas, 2001. Universitat de Barcelona).

Esta situación favoreció el desarrollo kárstico por la entrada de aguas meteóricas por las zonas de fractura hasta niveles del Muschelkalk inferior (M I). Con posterioridad estos fluidos con Azufre disuelto procedente de las facies triásicas (a partir de los sulfatos del Keuper y M II), sufrieron una migración ascendente a una velocidad suficiente para impedir su enfriamiento, y penetrar por las fracturas a los niveles mas permeables de la Fm. Bobalar, lo que explica la generación de un "karst caliente" de corrosión y precipitación, según un modelo hidrogeológico hidrotermal, como vestigio del cual aún existe contenido en SH₂ (durante la perforación de la formación Ascla en el sondeo Maestrazgo 1 y durante la perforación de sondeos en la plataforma marina Mediterránea próxima). En esta época también se generaron procesos de desdolomitización, sobre todo ligados a cemento esparítico, lo que incrementa la porosidad de la serie.

La sucesión de distintas etapas de generación kárstica, así como la importante monotonía carbonática de la potente serie estratigráfica carbonática jurásico-cretácica, su afectación por fallas distensivas y su larga etapa de exposición subaérea, ha originado un importante desarrollo kárstico del conjunto Jurásico-Neocomiense, puesto de manifiesto en las pérdidas totales de lodo, en importantes tramos, durante la perforación de los sondeos en la zona hasta alcanzar las series evaporíticas o arcillosas del Triásico. Este hecho influye y caracteriza el modelo hidrogeológico de la zona y explica la naturaleza dulce de las aguas a gran profundidad.

Según los datos de sondeo, como base del conjunto acuífero aparece la formación dolomítica anhidrítica Cortes de Tajuña (Lias inferior Hettangiense), a partir de la cual los valores de salinidad del agua contenida en esta formación y las formaciones infrayacentes indican un carácter salino. Por tanto, las facies anhidríticas constituyen una barrera de impermeabilidad e implican la desconexión de las series más profundas del agua de infiltración superficial. Cuando esta formación se encuentra ausente por falla, y si se encuentra presente la serie Keuper, así mismo con características de sello de impermeabilidad, sería ésta la que podría constituir la base del conjunto acuífero.