

V. FORMAS Y MECANISMOS DE ALTERACIÓN

El trabajo se ha centrado en el estudio de las areniscas miocénicas, puesto que, constituyen la mayor parte del material utilizado en la construcción del acueducto en el transecto del Oued Miliane.

V.1. FORMAS DE ALTERACIÓN:

Se ha estudiado y cartografiado un tramo del acueducto romano, en concreto, el tramo 3 del transecto del Oued Miliane (Fig. V.1), que no está aún intervenido por las obras de restauración realizadas por el Instituto Nacional de Patrimonio de Túnez; esto ha permitido de estudiar los indicadores de alteración en su estado original (Fig. V.2). Estas formas se han representado sobre alzados arquitectónicos (Fig. V.3) realizados en interiores fases de investigación del grupo “Parmon” de la universidad de la UAB. (Álvarez et al., 2000; Figueiredo et al., 2000).

Tras una detallada observación y reportaje fotográfico digital, se ha identificado y descrito las formas de alteración más significativas siguiendo la normativa, criterios y definiciones de otros autores (Doc. Normal 1/88, C.N.R-I.C.R., 1990; Ordaz y Esbert, 1988; Fistner et al., 1992; Prada, 2002).

Estos indicadores se han clasificado en grupos, atendiendo a la disposición con respecto a la superficie de la roca, por ejemplo, recubrimiento, o atendiendo a un mecanismo de alteración como por ejemplo, el desprendimiento granular, por tanto, se han clasificado en general atendiendo a un criterio genético, esto es según los procesos de formación. El monumento presenta escasa diversidad en cuanto a las formas de alteración de la piedra y que podemos clasificar en los siguientes tipos:

- Grupo 1. Recubrimientos superficiales:

Son transformaciones de la superficie de piedra sin pérdida o desprendimiento del material. Comprende sobre todo costras pátinas y depósitos superficiales (Fig. V.5).

1.1. Pátina amarilla ferruginosa: se trata de una pátina de envejecimiento natural, que recubre casi todos los sillares, especialmente o más intensa en la cara oeste con un grosor de apenas uno o dos milímetros, compuesta por óxido de hierro (gohetita y limonita) son similares a las descritas por diversos autores en areniscas silíceas (Jeannette, 1979). También se observan otras costras ferruginosas muy consistentes y que solo se observan en ciertas caras de algunos sillares. Estas costras son originales de cantera y no forman parte de las alteraciones observadas.

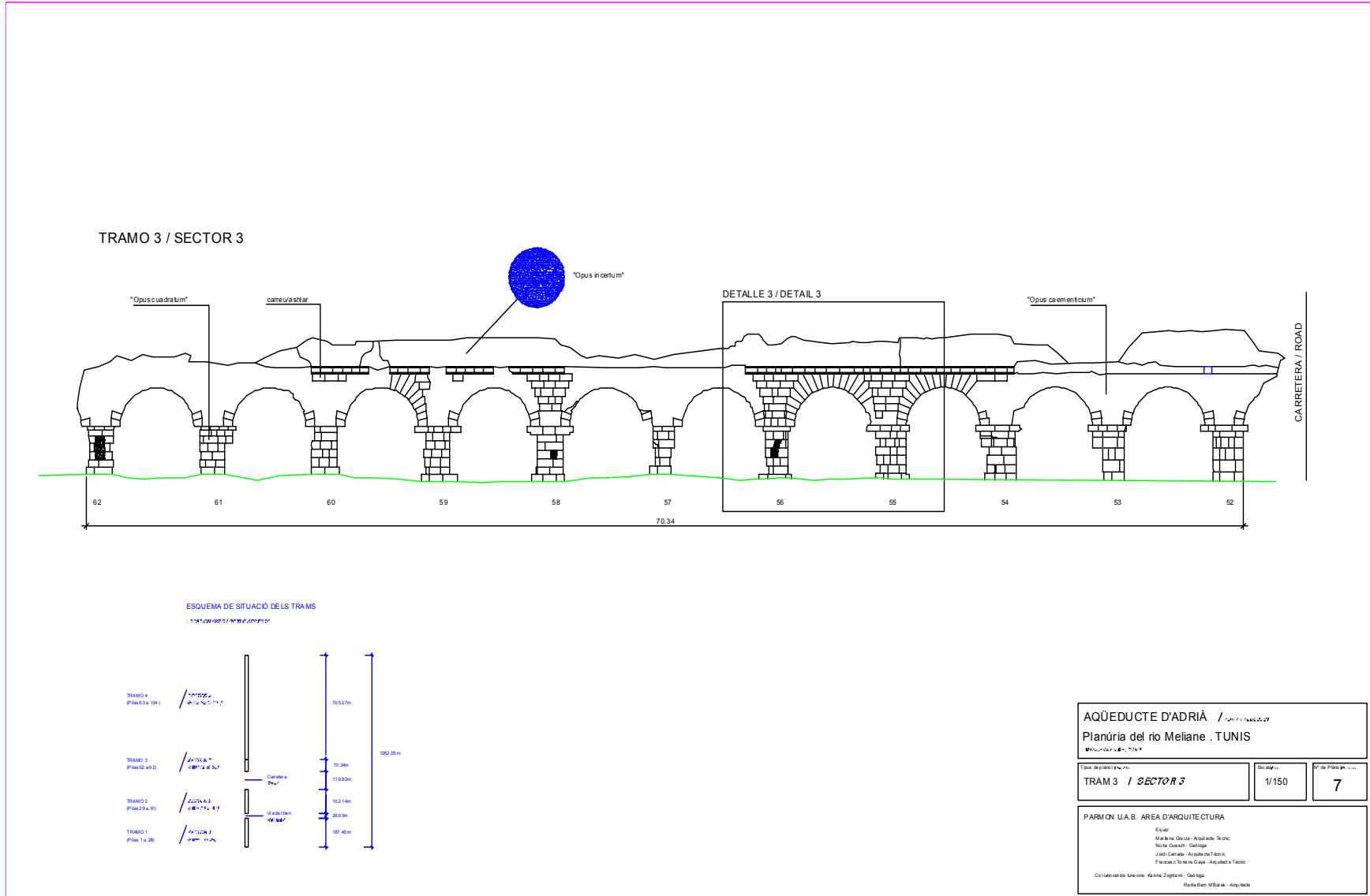


Fig. V.1: Alzado arquitectónico del tramo Oued Miliane del acueducto romano de Zaghouan- Cartago.



Fig. V.2: Parte cartografiada del tramo 3 del transecto Oled Miliane .

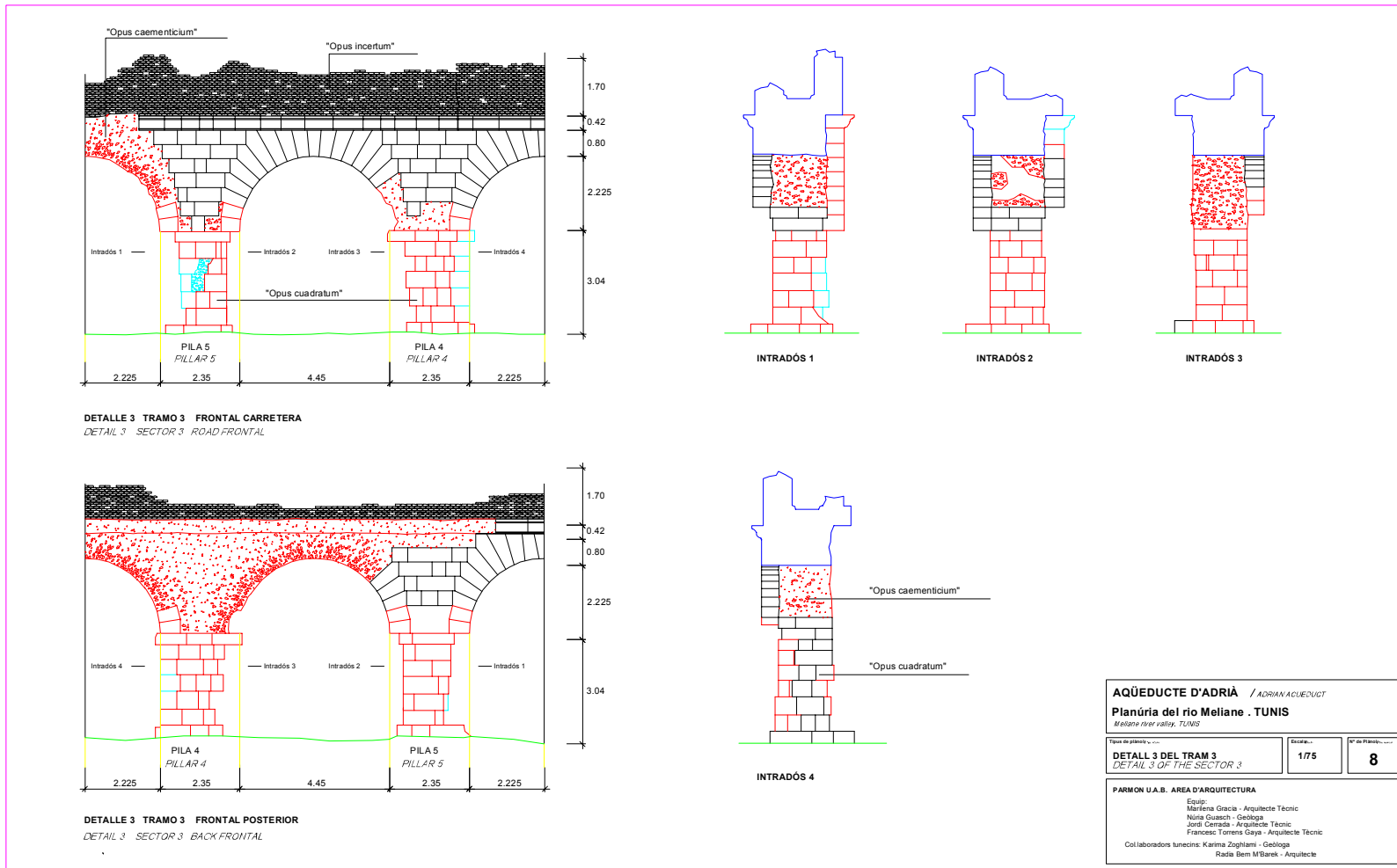


Fig. V.3: Alzados arquitectònics de la part escogida per a la realització de los mapping de litotipos y de alteraciones.

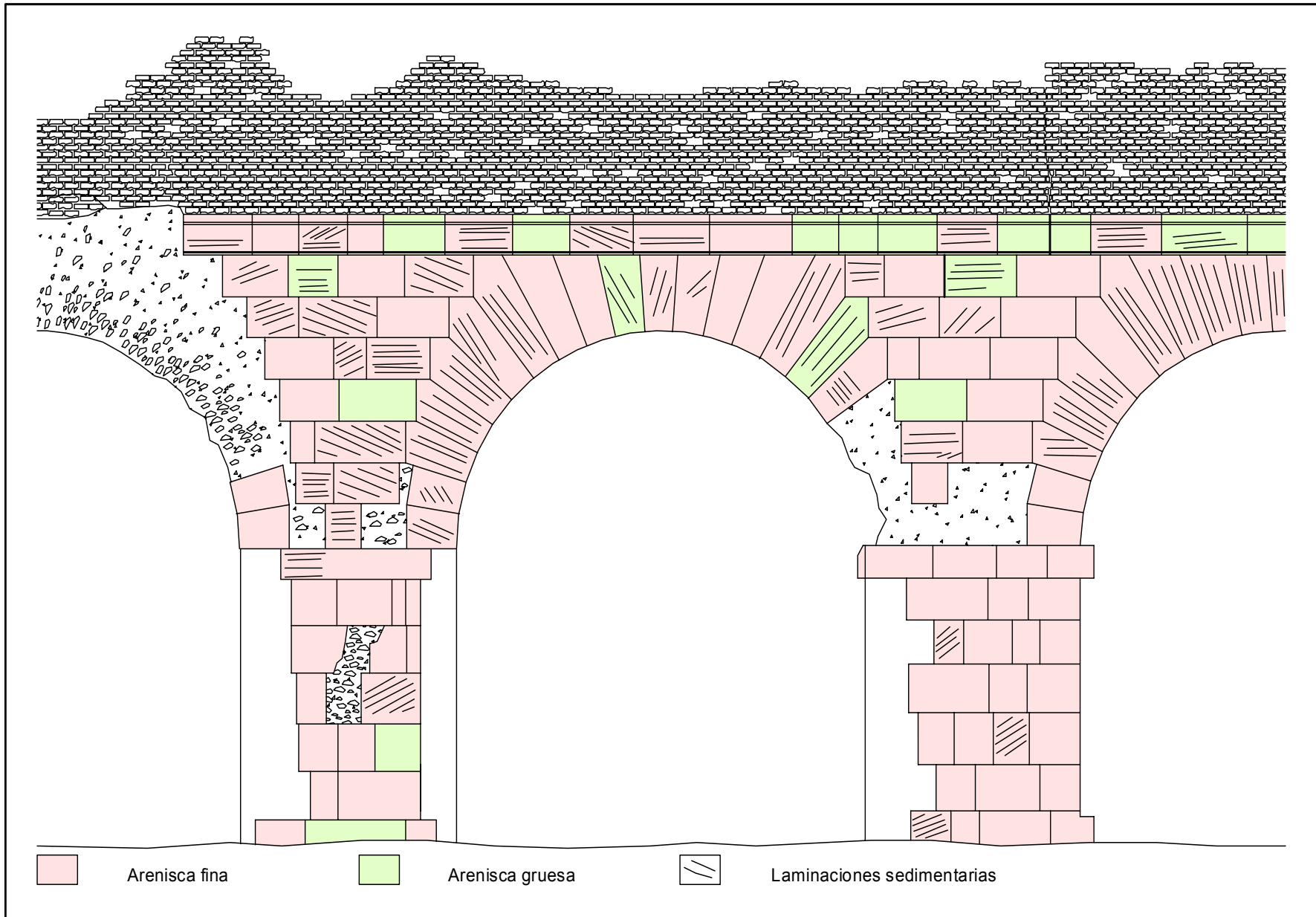


Fig. V.4: Mapping de litotipos de la zona escogida del tramo 3 del acueducto en la zona del Oued Miliane.

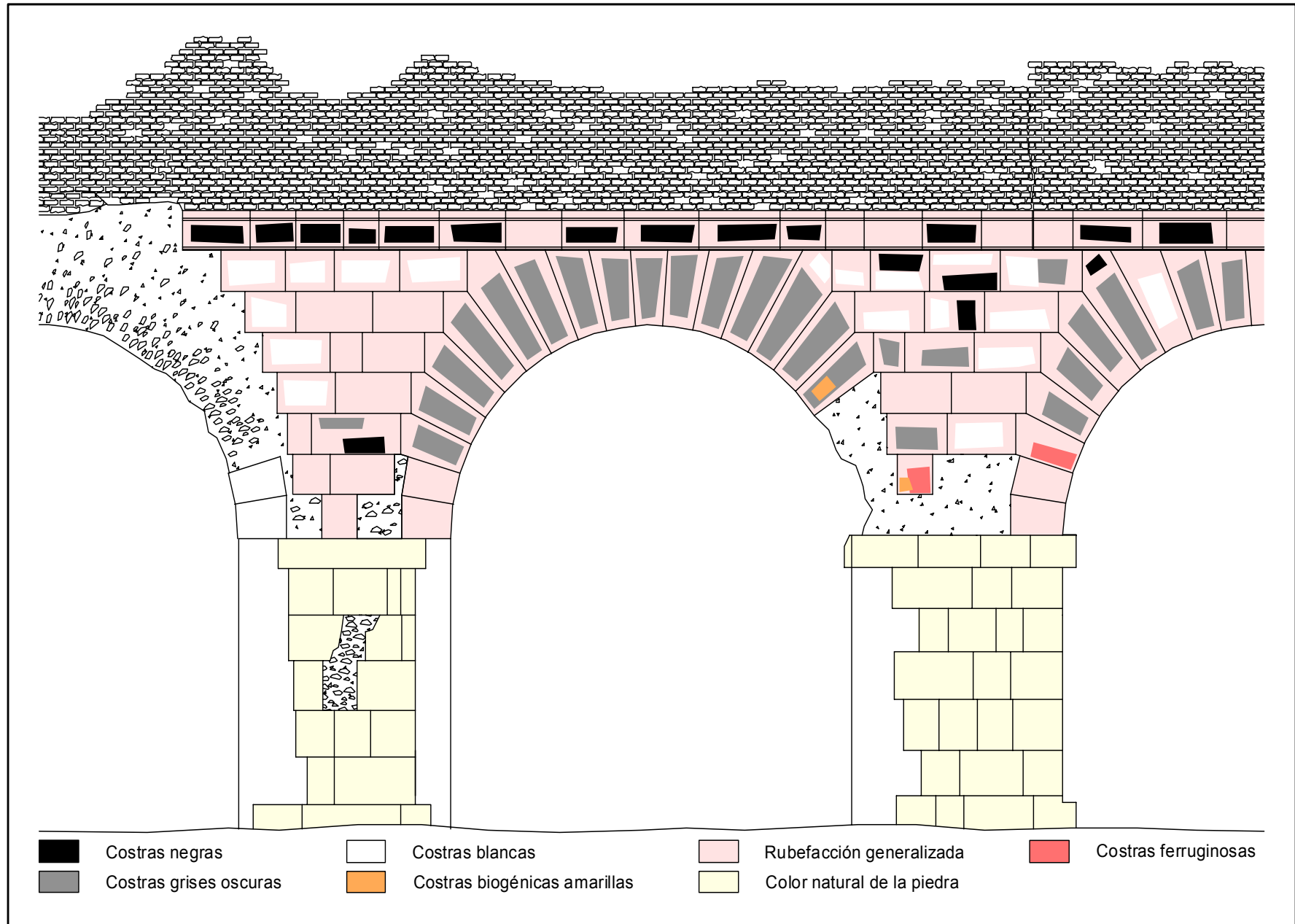


Fig. V.5: Mapping de recubrimientos de la zona escogida del tramo 3 del acueducto en la zona del Oued Miliane.

1-2. costras blancas carbonatadas: Se ha observado en la parte superior de los pilares del acueducto, por debajo de la canalización, unas costras blancas compuestas por carbonatos de grosor irregular y de textura lisa y compacta. Su localización cercana al canal y su composición carbonatada, parecen indicar que son producto de la reprecipitación del lixiviado de los morteros de cal (Tabla V.1), utilizados en la construcción de la canalización del acueducto, especialmente de las fabricas romanas del tipo *Opus caementicium* y del *Opus incertum*.

Tabla V.I. Composición química del mortero del canal del acueducto (Figueiredo et al., 2000).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₃	SO ₃	LOI	Cal/Qz
Roman (a)	34,24	3,54	0,76	0,37	33,67	-	0,41	-	-	26,94	1,77
Roman (b)	36,60	4,31	0,84	0,47	35,69	0,22	0,46	-	-	21,34	1,62

1-3. costras biogénicas: Hay diversos tipos de recubrimiento de color y de textura diversa debidos a la colonización superficial de la piedra por líquenes y algas. Están relacionados con la percolación, las filtraciones, y el grado de insolación., se pueden distinguir los siguientes tipos:

- Costras negras con moteados blancos.
- costras amarillas.
- costras verdes.
- costras gris oscuras.

En el tramo 3, se han identificado líquenes (*Catoplaca sp*), briofitos (*Didymodum acutus*, *Fossomdronia sp.*, *Gymnostomum viridulum*, *Grimmia orbicularis*, *pleurochaete squarrosa*, *Pseudocrossidium homschuchianum*, *trichostomun brachydontium* y *T.crispulum*.

- Grupo 2. Disgregaciones y oquedades:

Apenas se observan desprendimientos o disyunciones de costras o pátina. El mecanismo más generalizado parece ser la disgregación granular de la textura de la roca, por eso las formas de alteración más frecuentes son las áreas arenizadas y las alveolizaciones.

2.1. Áreas arenizadas: Se observa que casi todos los sillares están arenizados con mayor o menor intensidad.

2.2. Alveolización: Las disgregaciones granulares se pueden intensificar en ciertos puntos de la superficie de la roca, por diversas causas, frecuentemente por cristalización de sales, corrosión eólica o “choque” térmico, esto genera oquedades de diverso tamaño que

cuando superan el aspecto puntiforme o milimétrico de la picadura (pitting) se denomina alveolo. En nuestro caso se observan pocas áreas alveolizadas y se desarrollan sobre todo en los litotipos de granulometría gruesa (Figs. V.4 y V.6). Estos alvéolos, en general, están intensamente amenizados pero no presentan eflorescencias en su interior.

2.3. Acanaladuras: La desagregación granular se combina con la textura laminada de origen sedimentario de la roca creando formas de alteración diferencial con aspecto de surcos paralelos. La acción eólica y percolación son factores que favorecen el desarrollo de estas formas, por eso su localización esta relacionada con las zonas del monumento más expuestas al aire o a la lluvia.

2.4. Retroceso superficial: algunos sillares presentan una pérdida importante del volumen superficial con lo que se produce un retroceso del perfil original del sillar, en general esta pérdida de volumen no excede el 10-15 % excepto en las partes altas donde puede superar el 40 %. El mecanismo sigue siendo el de desagregación granular y es una evolución de este proceso y de las formas anteriores, arenizaciones y alveolizaciones, las que generan este retroceso.

2.5. Estriaduras: Son excavaciones delgadas en forma de estrías o rasgaduras debidas a heterogeneidades. En este caso estas estriaduras no son profundas y se producen a favor de las laminaciones sedimentarias debido a los cambios granulométricos, ya que se comportan como planos de discontinuidad.

2-6. Picaduras generalizadas: alteración puntiforme con eliminación de materia que se manifiesta a través de la formación de pequeñas cavidades no conectadas y mucho más pequeñas que en el caso de la alveolización.

- grupo 3. Discontinuidades físicas:

- 3.1. Fisuras y fracturaciones: los esfuerzos de orígenes estructural y el asentamiento diferencial del terreno, la pérdida y alteración de los morteros de junta han generado tensiones en la fábrica constructiva que se han transmitido a la piedra en forma de esfuerzos de diverso tipo (cizalla, estiramiento, compresión, etc) El resultado se manifiesta de manera localizada con la aparición de fisuras y fracturas lineales, rectas y poco ramificadas que cortan de manera vertical a los sillares. Se desarrollan más en las esquinas de los bloques produciéndose pequeños desprendimientos.

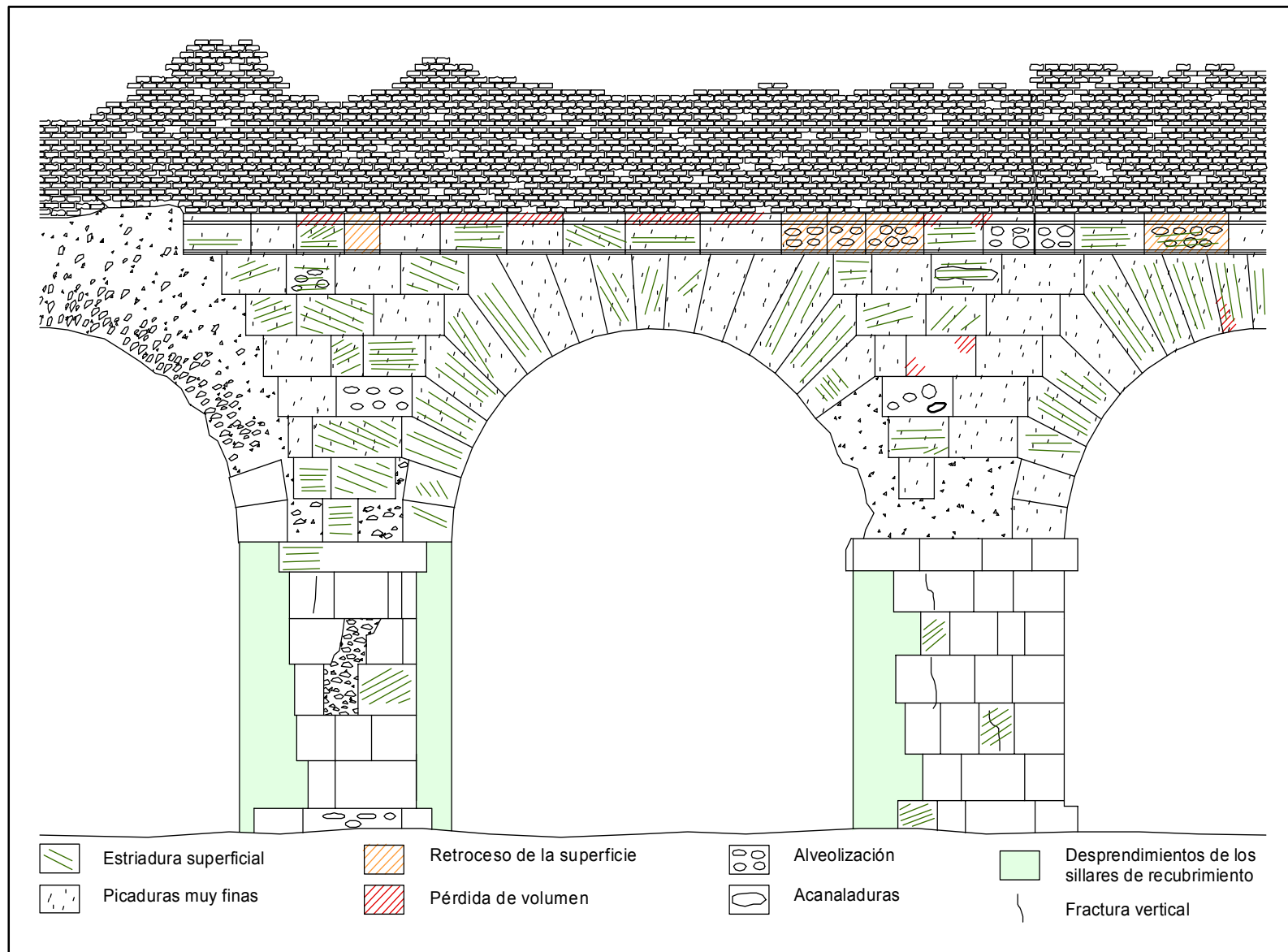


Fig. V.6: Mapping de desgregaciones de la zona escogida del tramo 3 del acueducto en la zona del Oued Miliane.

V.2. MECANISMOS DE ALTERACIÓN:

El efecto de las sales solubles es generalmente el agente más conocido y más directo que origina las formas de alteración observadas (arenización, alveolización, acanaladuras). Sin embargo, la realización del ensayo de extracción de sales solubles en los sillares del acueducto mediante la aplicación de apósitos excluye totalmente la hipótesis de una posible alteración relacionada con el efecto disruptivo de las sales soluble.

Para detectar la presencia de sales en el monumento se ha utilizado la metodología de extracción de sales por aplicación de apósitos en las zonas arenizadas (De Tommasi, 1989; Laurenzi Tabasso et al., 1992; Borelli y al, 1992; Borelli, 1994). Para ello se ha desarrollado el siguiente modo operatorio:

- Medir la conductividad y el PH del agua desionizada
- Poner 20 g de papel micronizado Arbocel-800 C en 200 cm³ de agua desionizada y dejar descansar una hora y después medir la conductividad y el PH de la solución resultante.
- Colocar la pasta de papel sobre las zonas arenizadas y taparlas con papel de plástico y papel de plata y dejarlo absorber durante 24 horas.
- Sacar los apósitos y ponerlos en 200 cm³ de agua desionizada durante 6h
- Medir la conductividad y el PH.
- También se ha medido el acidez superficial mediante papel indicador humedecido en agua desionizada.

Los análisis de control de las soluciones acuosas procedentes del lavado de las apósitos utilizados en la extracción de sales han revelado la ausencia de sales solubles (Tabla V.2).

Tabla V.2. Resultados obtenidos mediante la aplicación de los apósitos.

Nº apósitos	T ₀		T ₁ =T ₀ +1h		T ₁ +24h		conductividad final	acidez superficial
	Ω ⁻¹	pH	Ω ⁻¹	pH	Ω ⁻¹	pH	Ω ⁻¹	pH
1	58,7	6	73,8	6-7	71	6	-2,8	6-7
2	58,7	6	72,7	6-7	66,6	6	-6,1	6-7
3	58,7	6	60,4	6-7	32,4	6	-28	7
4	58,7	6	51,4	6-7	24	6	-31,4	7-8
5	58,7	6	62,5	6-7	56,2	6	-6,3	7-8
6	58,7	6	53,6	6-7	69,5	6-7	15,9	7-8
7	58,7	6	65,2	6-7	134,3	6	68,7	6
8	58,7	6	66,4	6-7	69,7	6	3,3	6
9	58,7	6	58,4	6-7	69,7	--	11,3	8-9
10	58,7	6	66,6	6-7	27	6	-39,6	6-7
11	58,7	6	63,5	6-7	17	6	-46,5	7-8

Ω⁻¹: μs.cm⁻¹.

Los resultados resumidos en la tabla V.2 indican que la conductividad resultante proporcional al contenido en sales es un valor muy pequeño y en algunos casos con valor negativo, esto indica que la piedra tiene muy pocas sales o su contenido es tan escaso que la porosidad de la piedra absorbe la disolución del apósito.

La realización del ensayo de extracción de sales mediante la aplicación de los apósitos ha excluido totalmente la hipótesis de la posible alteración de los sillares mediante el efecto disruptivo de las sales solubles, ya que estas últimas son generalmente el agente más frecuente y más directo de las formas de alteración (arenización – alveolización – acanaladuras) observadas en los monumentos.

Los pequeños sillares de granulometría gruesa que en forma de cornisa se encuentran por debajo del conducto que transportaba el agua (Fig. V.4 y V.6)), sufren, generalmente, un importante retroceso de su superficie que conlleva una gran pérdida de material y fuertes alveolizaciones. Esta intensa alteración, hace pensar que sea el resultado de la cristalización de sales, puesto que la zona donde se ubican este tipo de sillares corresponde a la de máxima infiltración de aguas, tanto del conducto como de la lluvia. Estas aguas vendrían cargadas en elementos lixiviados de los morteros que son los que pueden generar sales susceptibles de ser acumuladas en estas zonas.

El análisis de los datos meteorológicos (Anexos 1 y 2) a lo largo de 10 años de la zona de Oued Miliane ha mostrado que:

- Las precipitaciones son muy escasas en la zona lo que dificulta la existencia de agua de escorrentía y en el subsuelo como nivel freático superficial.
- Hay una variación diaria de temperatura de alrededor de 10-15 °C que es mucho más acusada en los meses de verano. Esta variación llega a alcanzar una diferencia de 25 °C en la superficie del suelo.
- La insolación es de 8 a 12 h al día desde abril hasta septiembre y de 4 a 6 h el resto del año.
- La velocidad máxima del viento está comprendida entre 12 y 29 m/s. Los vientos dominantes son de dirección E-W durante los meses calurosos y probablemente están relacionados con el régimen de brisas por la proximidad al mar de la zona de estudio. El resto del año el viento dominante es de dirección SW/W. Este viento suele estar cargado de arena procedente del desierto.

Teniendo en cuenta estos datos, se puede decir que la superficie de los sillares, sobretodos aquellos orientados al Sur y al Oeste, están expuestas diariamente a muchas horas de insolación y al mismo tiempo a una variación brusca de temperaturas. Además la

superficie de los sillares puede alcanzar temperaturas muy elevadas, ya que la arenisca debido a su composición monomítica cuarzosa tiene un coeficiente de conductividad térmica muy bajo. Este fenómeno puede aumentar considerablemente la dilatación térmica de los granos de cuarzo de las caras externas de los sillares y por tanto, podría provocar efectos de roturas de granos o de contactos entre granos que facilitara el desprendimiento de los mismos (arenización) en la superficie de los sillares.

En efecto, el cuarzo cristalográficamente es un material anisótropo y como es lógico, esta anisotropía se manifiesta también en todas sus propiedades físicas. Así, por ejemplo, en cuanto a la dilatación térmica, la figura geométrica que la representa sería un elipsoide de revolución que vendría definido por dos vectores diferentes cuyos coeficientes varían según el rango de temperaturas considerado. A temperaturas experimentales comprendidas entre 20 y 155 grados (Raz et al., 2002), los valores de estos dos coeficientes son: $\alpha_{(a)} = 16.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (en la dirección cristalográfica a) y $\alpha_c = 10.9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (en la dirección c). Estos coeficientes permiten relacionar la diferencia de temperatura con la variación longitudinal del material según la fórmula:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T$$

donde,

$\frac{\Delta L}{L_0}$: es la variación por unidad de longitud

α : es el coeficiente (dependiente de la dirección en que se mide).

ΔT : es la variación de temperatura.

En la zona donde se ubica el monumento, las variaciones diarias de temperatura son de 10 °C de media en invierno (7 y 17 °C) y de 15 °C en verano (19 y 34 °C). Por tanto, para las fachadas orientadas al N será este el rango de variación de temperaturas pero para las orientadas al S y sujetas al máximo de insolación, la temperatura que alcanzarán las superficies de los sillares será mucho más elevada y, por tanto, la amplitud de la variación diaria, tanto en invierno como en verano, será mayor. Aunque no disponemos de este dato (oscilaciones térmicas en la superficie del sillar), esta variación diaria será como mínimo equivalente y por lógica mayor a la variación diaria de la temperatura de la superficie del suelo, que es de 15 °C en invierno (5 y 20 °C) y de 25 °C en verano (17 y 42 °C). Este impacto térmico además, se verá acentuado por la baja conductividad del cuarzo que hará que la superficie de los sillares se caliente mucho más que su interior.

Estas diferencias de temperatura provocarán diferencias de dilatación tanto entre los granos de la superficie de los sillares respecto a los del interior como entre los granos monocristalinos (la mayoría de los granos de cuarzo de estas rocas lo son) que se encuentren juntos y soldados por presión-disolución y con orientaciones cristalográficas diferentes. Estas diferencias de dilatación originan un esfuerzo de cizalla en las superficies de presión-disolución que podrían provocar la desunión de estos contactos y por ende la desagregación de los granos. Esto conllevaría una arenización que es la forma dominante de alteración en obra de esta roca.

Para comprobar si este proceso es factible se ha realizado una estimación de los valores de esfuerzo que se producirían por efecto de la dilatación diferencial a partir de los datos experimentales de Raz et al. (2002).

Para la época hivernal, el esfuerzo equivalente a la dilatación diferencial llega a un máximo de 7 MPa mientras que para verano alcanzaría los 12 MPa. Estos valores se han calculado a partir de ecuaciones extraídas de los datos experimentales de compresibilidad del cuarzo de Raz et al. (2002). Los ensayos de compresión realizados en las muestras de arenisca de las canteras romanas, que suministraron el material de construcción del acueducto, dan valores de rotura entre 4 y 25 MPa, dependiendo de las variaciones texturales de la roca. Estos esfuerzos tendrían valores equivalentes de rotura por cizalla de como máximo 12,5 MPa calculado a partir de la construcción de Mohr, es decir, del mismo orden de magnitud que los valores de esfuerzo resultantes de la dilatación diferencial. Por tanto, podemos afirmar que la dilatación térmica diferencial del cuarzo es un mecanismo que perfectamente, por si solo, puede explicar la arenización de los sillares del monumento.

Otro mecanismo muy probable que puede ser el origen de la arenización y la alveolización superficial de los sillares de arenisca, es la abrasión eólica generada por los vientos cargados en arena procedentes del sur y del oeste (Tabla V.3).

Tabla V.3. Agentes y mecanismos de alteración de la arenisca de los sillares del acueducto.

Monumento (formas de alteración)	mecanismos	agentes intrínsecos	agentes extrínsecos
-zonas arenizadas. -alvéolos-cavernas.	a-ciclos de dilatación térmica.	-falta de fase cementante en la roca. -bajo factor de compactación. -mala conductividad térmica de los minerales iónicos (cuarzo).	-choque térmico y fuertes oscilaciones estacionales.
	c-abrasión eólica	-baja resistencia a la abrasión -baja compactación de la roca	-alta velocidad del viento -viento cargado en arena
-costras biológicas: -costras negras con moteados blancos. -costras verdes. -costras gris oscuras. -costras amarillas	-alteración biológica por la acción de: -plantas verdes. -líquenes. -champiñones.	-liberación de ácidos que pueden atacar a la roca. Pero en este caso, este tipo de alteración no puede afectar a la roca, ya que, no tienen componentes alterables o componentes que pueden reaccionar con los ácidos.	-crecimiento de líquenes, de champiñones y de algas.
-costras y pátinas no biológicas: -costras blancas	-reprecipitación de los carbonatos procedentes de los morteros utilizados en la construcción y en las diferentes restauraciones.	-alta permeabilidad de la roca	-clima seco y altas temperaturas.
-pátinas de envejecimiento	-migración de los óxidos hacia la superficie de los sillares.	--	-clima estacional
-fisuras y fracturas lineales	-sobre carga	-baja resistencia a la compresión	--

Anexo 1: Tablas de datos meteorológicos recogidos en la estación de Zaghuan correspondientes al lustro 1993-1997.

		E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
Tª	Media min	3.68	4.44	5.67	8.00	12.79	16.46	18.66	19.57	17.88	15.35	9.70	6.15
	Media max	14.82	13.76	17.04	22.62	26.56	31.85	34.15	36.42	31.53	27.98	20.27	16.74
Precip mm/duración horas		30.80	33.10	52.6	6.00	45.40	0.30	-	2.30	36.40	21.60	23.00	23.20
Insolación (horas)		170.90	104.10	-	258.10	286.60	241.30	321.30	329.80	235.90	193.90	160.70	152.80
Velocidad máx viento instantánea (m/s)		12	14	15	16	13	15	14	12	19	13	22	12
Viento dominante		W	E/W	E/W	E/W	E/W	NE/NW	NE-E/NW	NE-E/W	NE-E/W	N/E	S/W	NW
Humedad relativa media (%)		81.00	76.15	75.70	64.80	66.50	54.30	55.20	48.90	67.78	68.20	67.4	71.30
Tª	Media min	1.08	2.14	3.72	5.69	11.50	14.79	15.92	17.48	15.95	13.52	7.77	4.22
	Media max	17.89	17.54	21.15	28.55	33.63	39.30	41.18	43.78	37.62	32.42	24.03	19.16

		E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
Tª	Media min	7.20	5.63	6.50	8.62	14.51	16.60	18.93	21.87	19.42	15.53	10.73	6.62
	Media max	15.79	16.56	21.23	20.37	30.76	31.64	35.71	38.16	32.26	25.38	21.89	18.06
Precip mm/duración horas		25.10	52.30	6.50	34.10	7.10	3.30	15.70	-	34.20	48.20	10.20	9.70
Insolación (horas)		128.40	162.80	250.80	229.60	312.90	328.30	361.00	344.90	228.30	177.70	189.10	177.60
Velocidad máx viento instantánea (m/s)		17	19	15	17	18	14	11	12	20	12	-	-
Viento dominante		NW	NWSE	SE/NE	NW/SE	SE/NW	SE/NW	SE/NW	SE	N/E	NW	W	W
Humedad relativa media (%)		72.20	71.30	71.60	64.00	52.40	54.30	43.40	52.10	63.70	76.90	72.90	70.70
Tª	Media min	5.63	3.37	4.23	6.54	12.79	14.92	16.78	19.47	17.56	13.85	8.18	3.87
	Media max	18.33	19.53	27.17	25.87	37.16	38.29	48.94	44.60	37.71	3.13	25.70	20.10

		E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
Tª	Media min	4.49	6.66	6.32	8.47	12.78	17.45	19.11	21.25	18.14	13.57	10.38	8.72
	Media max	14.58	19.56	18.03	21.18	28.42	31.54	31.54	35.08	24.53	29.68	25.28	18.14
Precip mm/duración horas		66.40	0.70	33.80	22.60	2.80	20.30	0.40	15.00	83.00	24.70	53.10	116.20
Insolación (horas)		163.10	211.30	229.20	250.10	296.70	278.60	360.10	295.20	212.90	230.90	168.90	172.40
Velocidad máx viento instantánea (m/s)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Viento dominante		W/NW	W	E/W	ENW	-	-	-	-	-	-	-	-
Humedad relativa media (%)		73.20	78.60	75.80	76.40	56.10	56.20	50.70	58.40	64.70	74.60	66.10	76.20
Tª	Media min	2.01	4.14	3.91	5.92	10.13	15.44	17.08	19.61	16.58	11.21	8.31	6.07
	Media max	16.74	23.27	22.55	26.96	35.68	38.74	42.17	41.54	34.88	31.05	23.81	20.47

		E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
Tª	Media min	7.06	5.29	7.25	8.80	12.06	15.23	17.60	20.89	16.86	12.56	10.04	6.97
	Media max	16.53	14.31	17.64	19.93	25.40	29.57	34.43	35.39	28.27	23.94	22.25	18.43
Precip mm/duración horas		95.90	61.40	41.40	88.80	63.00	19.80	12.20	39.50	29.03	10.50	8.00	23.60
Insolación (horas)		160.10	132.70	214.40	181.70	283.60	278.30	227.90	-	226.30	212.50	169.50	185.10
Velocidad máx viento instantánea (m/s)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Viento dominante		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Humedad relativa media (%)		78.40	77.70	78.70	75.30	68.00	64.00	51.00	61.20	64.10	64.20	59.70	66.80
Tª	Media min	4.90	3.43	5.07	7.15	9.62	13.00	15.08	18.87	14.84	10.27	8.13	4.38
	Media max	19.75	17.53	22.47	25.52	31.76	36.68	41.98	42.41	33.52	28.66	25.51	21.00

		E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
Tª	Media min	7.18	6.36	5.78	7.89	13.67	18.82	19.96	20.42	18.04	15.06	10.16	7.62
	Media max	16.45	17.16	18.80	20.30	28.40	34.18	34.21	34.44	28.47	25.76	19.97	16.11
Precip mm/duración horas		73.10	22.50	13.50	57.70	1.10	1.80	0.70	25.30	105.6	65.60	70.20	77.00
Insolación (horas)		125.60	193.50	267.60	224.0	306.20	284.40	336.00	304.60	222.00	235.90	147.20	121.80
Velocidad máx viento instantánea (m/s)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Viento dominante		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Humedad relativa media (%)		74.70	79.10	69.50	68.10	57.40	54.00	56.40	61.20	78.80	77.50	81.10	81.20
Tª	Media min	41.90	3.71	2.85	5.72	11.24	16.7	17.44	18.57	16.49	13.00	7.93	5.21
	Media max	19.25	21.14	24.48	25.79	35.27	42.30	41.58	42.02	34.97	39.097	23.41	18.86

Anexo 2: Tablas de datos meteorológicos recogidos en la estación de Zaghuan correspondientes al lustro 1998-2002.

ZAGHOUAN – MOGRANE - 1998													
		E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
Tª	Media min	4'80	4'77	5'87	9'79	12'35	17'59	19'46	19'77	18'63	19'57	7'98	5'05
	Media max	15'95	17'48	13	23'89	26'27	34'14	36'44	35'15	31'36	24'24	18'47	14'91
Precip mm/duración horas		25'8	28'7	20'1	19'7	19'3	8'1	-	12'9	60'5	100'6	41'9	49'7
Insolación (horas)		161'6	206'2	207'3	256'3	274'9	323'2	384'7	335'1	250'8	207'1	158'5	181'1
Velocidad máx viento instantánea (m/s)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Viento dominante		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Humedad relativa media (%)		81'2	77'3	73'7	66'2	64'6	48'7	50'5	55'0	73'7	74'2	74'0	77'7
Tª	Media min	1'92	1'92	3'15	7'12	10'10	14'82	17'04	17'40	16'80	10'94	4'81	2'61
	Media max	20'19	22'79	23'51	30'97	35'9	42'47	44'37	24'10	37'98	28'84	21'96	18'36

ZAGHOUAN – MOGRANE - 1999													
		E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
Tª	Media min	6'45	4'48	6'71	8'30	14'81	18'04	19'68	22'92	19'55	15'5	9'68	6'4
	Media max	14'82	13'49	17'7	22'34	30'16	33'25	34'64	38'38	32'76	29'07	19'83	15'44
Precip mm/duración horas		244'1	26'5	48	7	26'3	15'7	4'7	3'1	56'9	12'2	129	40'2
Insolación (horas)		121'5	151'9	230'2	262'8	290'3	280'1	361'6	308'6	262'4	229'9	161'9	133'8
Velocidad máx viento instantánea (m/s)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Viento dominante		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Humedad relativa media (%)		81'8	69'5	79'5	71'3	62'2	52'3	53'7	55'5	68'5	63'7	76'1	76'1
Tª	Media min	3'91	1'82	3'48	5'19	12'61	15'55	16'96	20'46	17'06	12'69	7'63	4'11
	Media max	17'13	17'54	22'94	29'6	39'23	41'73	43'12	46'8	39'69	35'13	23'44	18'15

ZAGHOUAN – MOGRANE - 2000													
		E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
Tª	Media min	3'66	5'02	6'86	10'31	15'04	16'5	19'37	18'72	18'19	14'54	10'9	7'2
	Media max	13'49	16'28	20'15	23'55	27'66	30'91	35'99	36'89	31'24	24'43	21'22	18'63
Precip mm/duración horas		15'9	20'7	16	26'8	100'1	0'8	-	-	48'7	117'9	20'5	59'9
Insolación (horas)		167'1	217'4	223	254'5	254'1	324'8	368'6	359'9	267'1	208'8	161'9	166'7
Velocidad máx viento instantánea (m/s)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Viento dominante		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Humedad relativa media (%)		83'6	76'1	67	69'4	72'9	61'7	52'3	50'8	65'7	75'3	66'1	61'2
Tª	Media min	1'35	2'29	2'96	5'18	13'08	13'56	16'59	15'81	15'42	12'19	7'23	4'11
	Media max	16'82	20'49	25'50	30'45	36	39'53	44'46	45'26	38'37	29'43	24'92	22'36

ZAGHOUAN – MOGRANE - 2001													
		E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
Tª	Media min	5'59	5'05	8'64	8'53	13'66	16'71	19'75	20'06	18'33	16'77	11'10	6'44
	Media max	16'19	16'30	24'05	22'55	27'42	33'49	36'21	35'52	30'83	29'63	20'57	15'41
Precip mm/duración horas		51'8	20'4	12'5	21'2	35'8	0'2	0'3	-	59'3	16'9	31	39'6
Insolación (horas)		155	186'4	241	237'4	250'8	350'2	338'4	348'8	260'6	253'2	153'5	130'4
Velocidad máx viento instantánea (m/s)				21	25	24	18	21		29	16	26	21
Viento dominante		SW/E		W	W/E	W/E	E/W	E/NW		E/W	E/NE	SW/W	SW/W
Humedad relativa media (%)		81'6	79'5	68'8	69'2	67'0	50'9	55'5	60	69'5	69'1	77'4	82'6
Tª	Media min	2'71	2'42	5'38	5'51	11'67	14'19	17'88	17'55	16'41	14'50	8'2	3'62
	Media max	19'45	19'84	29'18	29'28	38'87	41'84	44'30	44'04	37'53	35'20	23'8	17'92

ZAGHOUAN – MOGRANE - 2002													
		E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
Tª	Media min	3'75	6'3	8'87	10'51	14'11	17'23	20'6	21'10	18'33	14'75	12'6	8'25
	Media max	15'86	19	21'38	23'38	26'52	33'96	34'83	34'62	30'25	27'06	21'21	17'44
Precip mm/duración horas		10'3	8'8	16	57'8	42'8	5'6	21'9	17'5	29	29'4	81'9	46
Insolación (horas)		178'5	172'8	206'5	243'5	306	349	311'9	285'5	225'5	243'9	135'4	160'1
Velocidad máx viento instantánea (m/s)		26	18	27	21	28	21	20	27	19	25	24	25
Viento dominante		SW	SW	E/SW	E/SW	E/W	E	E/W	E/W	E/SW	E/SW	W/SW	W/SW
Humedad relativa media (%)		78'9	75'8	68'6	69'1	61'8	46'1	50'1	55'6	63'6	63'8	66'5	770'13
Tª	Media min	0'13	3'38	6'15	6'9	11'58	13'97	18'52	18'43	15'83	11'15	9'96	5'02
	Media max	18'7	23'10	26'29	28'97	32'95	41'43	41'91	41'44	63'64	32'06	23'88	19'62

**VI.SEDIMENTOLOGÍA DE LA
UNIDAD SUPERIOR CONTINENTAL
DE LA FORMACIÓN FORTUNA**



VI.1. ESTRATIGRAFÍA Y FACIES DE LA UNIDAD SUPERIOR DE LA FORMACIÓN FORTUNA:

La unidad superior de la formación Fortuna es en la que estratigráficamente se ubican las canteras romanas de las cuales extrajeron la mayor parte del material para construir el acueducto de Zaghouan-Cartago en la región del Oued Miliane (Fig. VI.1 y VI.2). En esta región y, en concreto, en los alrededores de Khledia esta unidad superior posee una potencia de 130 m y está constituida por areniscas y areniscas rudíticas de diferentes tamaños de grano, de colores claros y de composición siliciclástica muy cuarzosa. La textura general de los granos es redondeada y bastante esférica lo que parece indicar que han sufrido un transporte intenso. Atendiendo al conjunto de características sedimentológicas, esta serie continental ha sido dividida en tres tramos (Fig. VI.3):

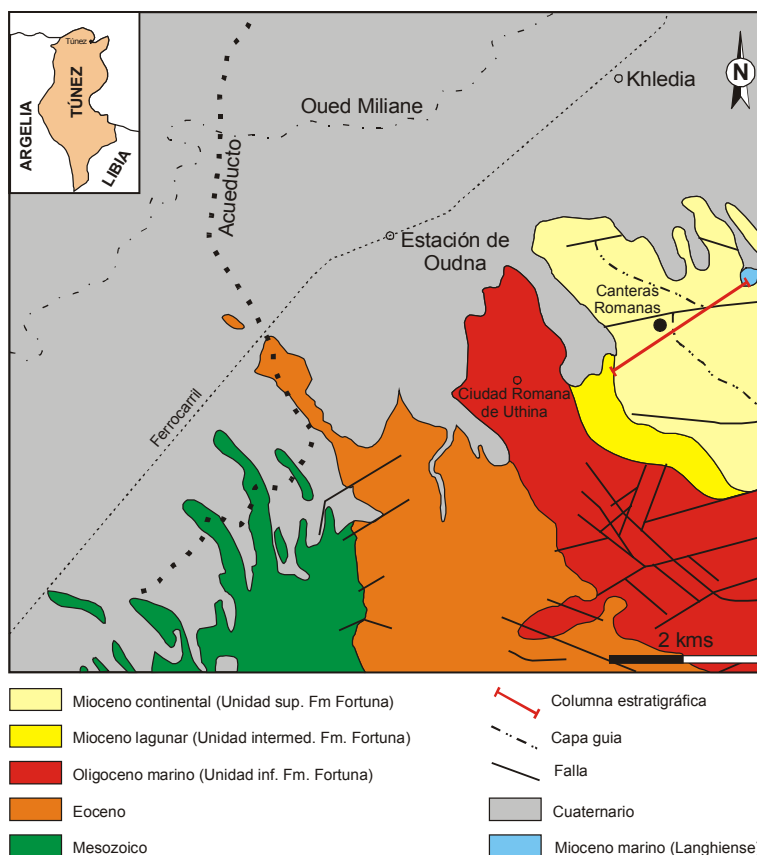


Fig VI.1: Mapa geológico de los afloramientos estudiados y situación de la columna estratigráfica realizada.

VI.1.1. TRAMO INFERIOR:

Posee una potencia de 70,9 m y esta constituido por niveles de arenisca de color ocre a amarillo y escasas ruditas (Fig. VI.3). Este tramo comprende desde el contacto con el oligoceno lagunar, contacto que coincide con la trazada del *oued*, hasta la capa guía que se encuentra hacia la mitad de la serie (Fig. VI.4D). Éste tramo ha sido dividido en tres niveles según la potencia de sus estratos y su organización.

Nivel 1:

Constituye la base de la serie posee 21,1 m de espesor y se caracteriza por la gran potencia de sus estratos que varía entre 2 y 3,4 m (Fig. VI.4A y 4B). Las areniscas tienen una granulometría gruesa a veces fina a media con pequeños cantos diseminados de 1 cm de diámetro. Hacia la base, las primeras capas presentan una bioturbación abundante generalmente debida a raíces, que han borrado las estructuras sedimentarias dándoles un aspecto muy masivo (Fig. VI.4C). Hacia el techo del nivel, la base de los estratos viene marcada por una alineación de



Fig.VI.2: Vista general de la serie del Mioceno continental(unidad superior de la formación Fortuna) en la región de Khledia. La serie estratigráfica se ha realizado de izquierda a derecha, siguiendo la carena de la montaña.

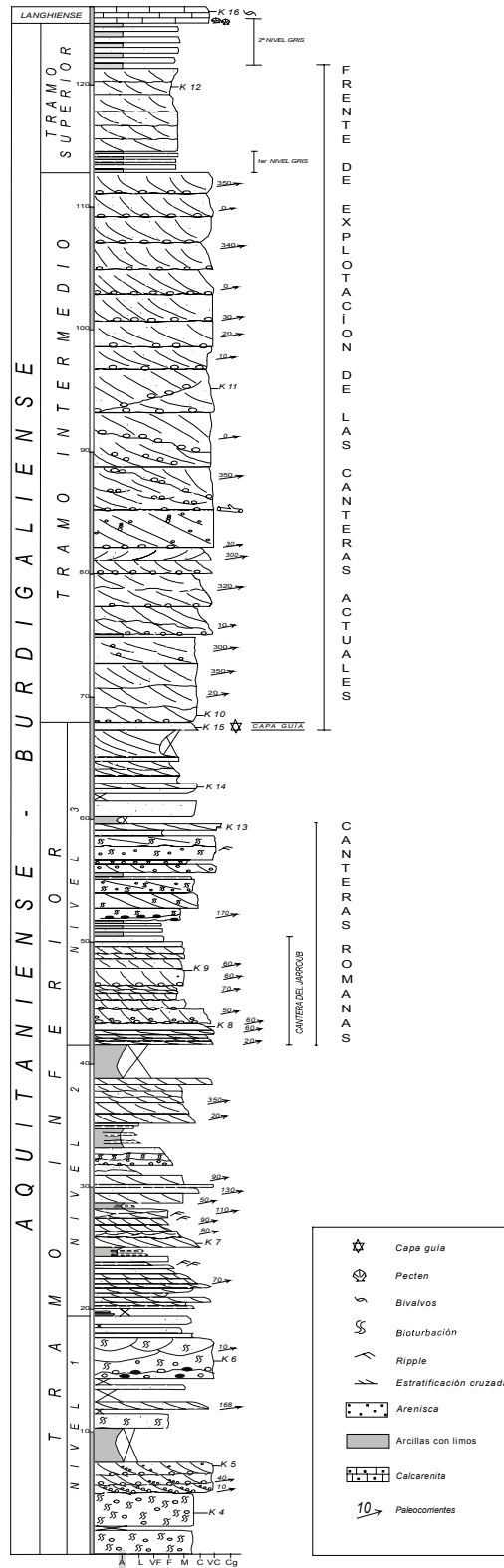


Fig.VI.3: Serie estratigráfica de la unidad superior de la formación Fortuna (Aquitaniense-Burdigaliense) en la región de Khledia.

cantos blandos, siendo el grado de bioturbación mucho menor, lo que permite ver que las estructuras sedimentarias más frecuentes son las laminaciones cruzadas a mediana escala y cruzadas en surco (Fig. VI.4B). Las paleocorrientes obtenidas en estas laminaciones varían entre N-10 y 40.

Nivel 2:

La potencia de este nivel es de 24,4 m y se caracteriza por tener estratos de arenisca de espesor mucho menor (0,4-1m) y porque en él son frecuentes las intercalaciones de estratos de arcillas grises y limos ocreos (Fig. VI.3). Los estratos areniscosos muestran laminaciones cruzadas que varían de mediana a pequeña escala, siendo el tamaño de grano mayoritario el de arena media aunque puede variar de fina hasta gruesa (Fig. VI.4E). La bioturbación es escasa y cuando aparece, lo hace en forma de *burrows* ferruginizados. Las paleocorrientes medidas presentan una gran dispersión y varían entre N-350 y N 190, siendo las más frecuentes las de N-110.

Nivel 3:

En este nivel de 25,4 m de potencia, las areniscas son de color ocre-amarillento. En los primeros 7,2 m, los estratos son de potencias comprendidas entre 0,3 y 1,5 m y tienen granoclasificación decreciente con arena muy gruesa en la base y media a fina en el techo (Fig. VI.3). Las bases son muy netas y los estratos suelen presentar un solo set de laminación cruzada, ligeramente asintótica hacia la base (Figs. VI.5 y VI.6A). En los siguientes 10 m de este nivel aparecen algunas intercalaciones decimétricas de arcillas grises. Las capas de areniscas son de color blanco y suelen estar más bioturbadas, lo que les confiere un aspecto algo más masivo, presentando generalmente laminaciones cruzadas no siempre muy bien definidas y *ripples* al techo (Fig. VI.6B).

En los primeros 17,2 m de este nivel fueron abiertos diversos frentes de canteras en la época romana (Figs. VI.5 y VI.6A y B), los cuales suministraron material para la construcción del acueducto de Zaghouan-Cartago en el tramo del Oued Miliane y de varios monumentos de la época entre los que resalta el espectacular anfiteatro de la ciudad de Uthina. Se puede afirmar, que los romanos escogieron este nivel para abrir sus canteras porque presenta menos intercalaciones de estratos lutíticos y porque las capas de areniscas poseen potencias más regulares y están organizadas, generalmente, en un solo set de láminas cruzadas. Estas características junto a un grado de litificación medio hacen que estas areniscas sean más fáciles de explotar y de modelar con la tecnología romana que las del resto de los niveles o tramos del



Fig.VI.4: Diferentes aspectos de la estratificación del tramo inferior de la unidad continental de la formación Fortuna. (A y B) Estratos de gran potencia con laminaciones cruzadas en los primeros metros del nivel 1. (C) Detalle de las bioturbaciones que afectan a la base de estos estratos. (D) Vista general de este tramo inferior de la serie. (E) Estratificación muy regular y laminaciones cruzadas a mediana escala típicas del nivel 2 de este tramo.

Mioceno continental y que, por tanto, sean mucho más adecuadas a la hora de utilizarlas como piedra de construcción.

Los últimos 8,2 m de este nivel se caracterizan por la presencia de dos capas de areniscas que destacan en el paisaje por ser más duras y de color oscuro. La primera tiene 0,5 m de potencia y se encuentra coronando el nivel de explotación de las canteras romanas. Esta capa presenta una laminación cruzada a mediana escala, su composición es también siliciclástica pero posee una mayor cementación, sobre todo por óxidos de hierro, los cuales le otorgan una mayor dureza y su característico color oscuro. La segunda capa se encuentra 6 m por encima de la capa anterior y marca el final del tramo inferior. Estos 6 m corresponden a una arenisca de tamaño de grano variable entre medio y grueso con pequeños cantos dispersos. Los estratos son de 0,4 a 1,2 m de espesor, de aspecto masivo o con laminación cruzadas a media escala no muy marcadas.

Esta segunda capa dura se ha escogido como capa guía por su mayor continuidad lateral y por su fácil identificación en el paisaje, ya que, destaca por su color marrón oscuro y por su gran dureza Fig. VI.1), siendo ya denominada como capa de referencia en el Mapa Geológico de Bir Mcherga (Jauzein, 1957). Esta capa posee 0,6 m de potencia, su aspecto es muy masivo y se encuentra muy cementada por dolomita lo que hace que realmente sea difícil extraer una muestra de ella. Los análisis realizados sobre esta capa y publicados en dicho mapa geológico mostraron los siguientes resultados:

SiO₂ 54,7%; CaO 15,2%; FeO₃ 3,5%; CO₂ 19,2%; MgO 6,4%

Estas proporciones resaltan el carácter dolomítico de la capa y corresponden a un porcentaje aproximado de 17% en mineral de dolomita con respecto al total de la muestra.

Estas dos capas de características bien diferenciadas han ayudado a la hora de medir la columna estratigráfica, puesto que, han permitido evitar las constantes repeticiones de la serie debidas a la presencia de fallas paralelas a la trazada cartográfica. Las paleocorrientes más frecuentes medidas en este tercer nivel varían entre N-50 y N-70.

VI.1.2. UNIDAD INTERMEDIA:

Por encima de la capa guía citada anteriormente, los estratos se vuelven más potentes entre 1 y 4,5 m de espesor, su grado de cementación es menor y no presentan ninguna intercalación arcillosa. Este tramo posee una potencia de 50,5 m y comprende desde la capa de referencia hasta el primer nivel gris, ya cercano al techo de la serie (Fig. VI.3). La granulometría



Fig.VI.5: Aspecto de las canteras romanas situadas en el nivel 3 del tramo inferior de la serie. La foto muestra la técnica de explotación que aprovecha el diaclasado regular de estos estratos de arenisca. La persona que hace de escala en el centro del fotomontaje (elipse) tiene como mucho 1,60 m de altura.

se vuelve más homogénea y es predominantemente gruesa a muy gruesa con pequeños cantos de cuarzo de 1 cm de diámetro máximo. Estas areniscas son de color más blanco y presentan una organización en base a sets de laminación cruzada a mediana escala, asintótica hacia la base, con frecuentes superficies erosivas, marcadas por la alineación de cantos de cuarzo tanto en la base como en el interior de los estratos. La composición general de estas areniscas sigue siendo muy cuarzosa al igual que en el tramo inferior. A 17,2 m de la base del tramo se observa un estrato con troncos ferruginizados que marcan claramente la superficie basal del mismo (Fig. VI.6D). Las paleocorrientes de este tramo han sido medidas siempre a favor del foreset de las laminaciones cruzadas y han dado direcciones de transporte, hacia el norte, comprendidas entre N-300 y N-30.

El conjunto de características descritas y, sobretudo el menor grado de litificación que presentan los estratos de areniscas permite explicar por qué este tramo está siendo explotado intensamente desde hace años para extraer una gran cantidad de arena, que es utilizada, fundamentalmente, como árido de construcción (arena de Khledia). El volumen de extracción es importantísimo, a juzgar por la altura de los frentes de explotación (unos 50 m), por el número y dimensiones de las canteras activas y por el tráfico intenso de camiones que entran y salen de estas explotaciones (Figs. VI.6C y 6E). A tenor de las características descritas se puede afirmar, que en este tramo intermedio de la serie no podían existir canteras romanas dedicadas a la extracción de piedra de sillares. Por el contrario, es el tramo más adecuado para que los romanos hubieran ubicado explotaciones de arena para la fabricación de los morteros que unen estos sillares aunque si hubieran existido éstas estarían, casi con toda seguridad, completamente destruidas por la gran superficie de terreno que abarca la intensa actividad extractiva de las canteras actuales.

VI.1.3. UNIDAD SUPERIOR:

Este tramo constituye el techo de la serie de la unidad superior continental de la formación Fortuna (Aquitaniense-Burdigaliense inferior a medio) en transición al Mioceno marino de edad Langhiense (Fm. Aïn Grab) (Fig. VI.3). Generalmente, aflora en la parte superior de los frentes de explotación de las diversas canteras actuales, lo que ha facilitado la correlación entre los mismos y la traslación lateral hasta el pequeño afloramiento del Mioceno marino (Figs. VI.6E y 6F). Consta de dos niveles grises representados por una alternancia decimétrica de 4 o 5



Fig.VI.6: Aspecto de las canteras romanas y actuales abiertas en la unidad superior continental de la formación Fortuna. (A) Detalle del frente de explotación de la cantera romana de la base del nivel 3 (tramo inferior de la serie continental) donde se observa que cada estrato suele estar constituido por un solo set de láminas cruzadas. (B) Detalle de la cantera romana del techo del nivel 3 (tramo inferior) de donde se extraían las areniscas de color más blanquecino que se han encontrado en el acueducto. (C) Cantera actual donde se explotan las areniscas del tramo intermedio y superior de la serie continental para su utilización como árido de construcción. (D) Detalle de los troncos fósiles ferruginizados que aparecen en el tramo intermedio. (E) Parte superior del frente de explotación de una de las canteras actuales donde se observa el contacto entre el tramo intermedio y los niveles lutíticos grises del tramo superior. (F) Falla principal de dirección N-40 que afecta a los tramos intermedio y superior.

capas de arcillas grises y de areniscas. El nivel inferior posee 1,6 m de potencia, mientras que el superior tiene 3,4 m de espesor. Estos dos niveles se encuentran separados por un estrato de arenisca de tamaño de grano medio y de 6,4 m de potencia cuya base es canaliforme y llega incluso lateralmente, a erosionar por completo el nivel gris inferior. La presencia de estos niveles grises también ha facilitado en gran medida la medición de la columna estratigráfica, puesto que, ha permitido evidenciar la gran cantidad de fallas que afectan al tramo intermedio y superior. La dirección principal de estas fallas es N-40 y llevan asociado un sistema secundario de dirección ortogonal. Las fallas suelen ser de salto métrico o incluso decamétrico y provocan innumerables repeticiones de la serie, siendo fácilmente observables en los diversos frentes de explotación de las canteras actuales. Por ejemplo, en la explotación situada más al S se observa una falla principal cuyo plano de falla constituye el extremo E de la cantera (Fig. VI.6F).

VI.1.4. MIOCENO MARINO (LANGHIENSE):

Sobre el nivel gris superior de la serie del Mioceno continental se dispone, discordantemente, la caliza lumaquélica correspondiente a la formación Aïn Grab (Burolet, 1956) y que es representativa de la transgresión marina de edad Langhiense superior en esta zona (Fig. VI.3). Esta caliza está constituida por capas de 20 a 30 cm de calcarenitas de color blanco con grandes fósiles (*Pecten sp*; *Sentella sp*; *Chypeaster sp*) que tan solo afloran en un pequeño cerro, denominado Sidi boukharrouba, al norte de las canteras actuales (Fig. VI.1). Según el mapa de Bir Mcherga (Jauzein, 1957), este afloramiento se encuentra cerca del sondeo de sidi Ibrahim (Grombelia 368'2 x 529'3).

VI.2. AMBIENTE SEDIMENTARIO DE LA UNIDAD SUPERIOR DE LA FORMACIÓN FORTUNA:

El conjunto de estructuras sedimentarias y estratificaciones descritas en las que dominan las facies arenosas del tipo St, Sp y Se (Miall, 1978) con cantos dispersos nos indican que estos sedimentos han sido transportados como carga de fondo mientras que la frecuente ausencia de finos (limos y arcillas) sería indicativa de que han sido transportados como material en suspensión sin llegar a acumularse.

Estas facies se han sedimentado a favor de canales y en llanuras arenosas (*sand-flat*). En los canales mayores se desarrollarían pequeños *lags* en la base y los *megaripples* que dan lugar a estratificación cruzada de surco. En los canales más pequeños se desarrollaría los *megaripples* de cresta recta cuya estructura interna es la estratificación cruzada planar tabular. En las llanuras arenosas, que están circundadas por los canales, la sedimentación se realizaría en forma de barras simples con estratificación cruzada y de bajo ángulo, *megaripples* de cresta recta y *ripples* que darían lugar a diferentes *sets*, mayores y menores, de estratificación cruzada planar.

Este conjunto de canales y llanuras arenosas serían constitutivos de un ambiente de sedimentación fluvial de tipo trenzado arenoso (*braided*), el cual estaría confinado en los laterales de un valle, quedando totalmente cubierto durante las etapas de inundación del mismo. A tenor de las paleocorrientes medidas, este curso fluvial transcurriría hacia el NE y E, es decir, paralelamente a la orientación de las principales direcciones estructurales de la zona.

Según Yaich (1994), la base de esta unidad superior de la formación Fortuna descansa sobre una discordancia que representa una superficie de erosión correlacionable a escala regional, la cual está relacionada con una bajada eustática del nivel del mar. Según este autor, esta bajada del nivel del mar tuvo lugar durante el Aquitaniense superior y provocó la emersión de la plataforma y la instalación de canales fluviales muy erosivos que marcan la entrada de los depósitos detríticos groseros de la unidad superior de la formación Fortuna.

VI.3. PETROLOGÍA DEL MIOCENO CONTINENTAL:

VI.3.1. COMPONENTES DETRÍTICOS:

Texturalmente, las areniscas de la serie del Mioceno continental poseen una granulometría que varía de fina a gruesa (Tabla 1). La base del tramo inferior presenta una granulometría media, mientras que hacia el techo el tamaño de grano es mucho más variable pudiendo ser de fino a muy grueso. La granulometría de los tramos inferior e intermedio es media y la del tramo superior es más constante y varía entre media y gruesa. Los granos suelen ser muy esféricos y bien redondeados y estar bien seleccionados en todas los tramos (Fig. VI.7A), a excepción, de las tres únicas capas que se encuentran muy cementadas, en las que estos índices pueden ser algo inferiores. En las areniscas de estas tres capas muy cementadas (muestras K-6, K-13 y K-15), los contactos entre granos son puntuales mientras que en el resto de las capas de la serie miocénica continental, son frecuentes los contactos cóncavo-convexos entre los granos del esqueleto (1-5'7%) (Fig. VI.7B). El porcentaje de estos contactos de presión-disolución va variando a lo largo de la serie, pasando de porcentajes de 1-1'6% (Nivel 1 y 2) o de 3-5'7% (Nivel 3) en el tramo inferior, a 4'1-4'4% en el tramo intermedia para disminuir de nuevo (1'4%) en el tramo superior.

Composicionalmente, los componentes del esqueleto de las areniscas de la serie miocénica (Tabla 1) son de tipo no carbonático extracuenal (NCE; Zuffa, 1985). El componente principal de estas areniscas es el cuarzo con porcentajes que van del 69,3 al 83,6% del total de la roca (Fig. VI.7C y D). Cuando las areniscas se encuentran bien cementadas (solamente en tres capas de los 130 m totales de la serie), el contenido en cuarzo disminuye (49'7-63'6% del total de la roca). El segundo componente es el feldespato y aunque aparece en todas las muestras, lo hace con porcentajes muy minoritarios (0-1'1%) (Fig. VI.7C). Este feldespato es de tipo potásico (ortosa y microclina) y su porcentaje aumenta ligeramente en los dos tramos superiores (0-0'4% en el tramo inferior; 0'2-1'1% en el intermedio y 0'6% en la superior). Como componentes accesorios aparecen micas (moscovita y biotita), minerales pesados (turmalina y zircón), fragmentos de chert y algún fragmento de roca plutónica compuesto por cuarzo y feldespato K. Dentro del cuarzo hemos distinguido diferentes categorías (tabla 1). La más abundante es el cuarzo monocristalino (Fig. VI.7C y D) con porcentajes que varían del tramo inferior (53'8-78'1%) a los tramos intermedio y superior (73'2-75'9%). Le sigue en importancia, aunque ya con

Tabla 1: Composición modal de las areniscas de la unidad superior de la formación Fortuna.

UNIDAD SUPERIOR	Tramo Inferior									T. intermedio	T. sup.	
	nivel 1			nivel 2	nivel 3							
LÁMINA	K 4	K 5	K 6	K 7	K 8	K 9	K 13	K 14	K 15	K 10	K 11	K 12
Componentes	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Cuarzo detrítico (NCE)	75,5	69,3	49,7	73,0	80,5	76,6	63,6	81,9	56,9	81,2	83,6	74,0
Q. monocristalino	69,0	56,8	40,3	53,9	68,8	61,9	53,7	74,7	52,4	68,1	70,5	69,3
Q. policristalino fino	--	1,2	--	--	--	--	0,2	0,2	--	--	--	--
Q. policristalino grosero	3,9	5,9	3,6	3,5	1,4	4,6	4,0	1,8	1,8	3,1	5,0	1,0
Q. metamórfico	--	0,4	2,6	1,6	0,4	1,0	1,2	0,2	--	2,1	2,1	0,6
Q. sintaxial heredado	1,6	3,4	0,4	1,6	1,9	1,5	2,6	1,6	0,6	1,4	--	0,6
Q. en FR. plutónico	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Q. monocristalino en c-c	0,4	1,6	--	1,2	4,9	2,3	--	3,0	0,4	3,7	4,2	1,4
Q. policristalino en c-c	0,6	--	--	0,2	0,8	1,3	--	--	--	0,4	0,2	--
Q. monocrist. ext. ondulada	--	--	1,2	7,9	1,8	2,5	1,2	0,4	1,0	1,4	1,2	1,0
Q. policrist. ext. ondulada	--	--	1,6	3,1	0,6	1,5	0,6	--	0,6	1,0	0,4	--
Feld. K detrítico	--	0,4	--	--	--	--	--	--	--	1,1	0,2	0,6
Microclina	--	0,4	--	--	+	+	--	+	--	+	+	0,2
Ortosa	+	+	+	+	+	+	+	+	--	0,9	0,2	0,4
Feld. en FR. Plutónico	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,2	+	--
Accesorios	--	0,6	+	--	--	--	0,6	--	--	0,2	--	--
Moscovita, Biotita	--	--	+	+	+	--	--	--	--	+	+	--
Turmalina, Zircón	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Bioclastos	--	--	--	--	--	--	0,6	--	--	--	--	--
Chert	--	0,6	--	--	--	--	--	--	--	0,2	--	--
Matriz	--	--	--	2,0	--	2,9	--	--	--	0,2	--	--
Matriz siliciclástica	--	--	--	2,0	--	2,9	--	--	--	0,2	--	--
Total diagenético	4,9	4,4	49,8	8,7	--	6,9	33,7	6,9	42,7	--	--	10,3
Coating ferruginoso	1,2	1,8	1,0	1,6	--	4,6	0,4	--	0,4	--	--	3,5
Cemento ferruginoso	--	--	4,2	0,2	--	0,2	0,4	0,4	3,4	--	--	--
Epimatriz	--	--	--	0,6	--	--	--	--	--	--	--	--
Coating arcilloso	3,7	2,6	--	6,3	--	2,1	--	6,5	--	--	--	6,8
Calcita	--	--	15,4	--	--	--	6,3	--	0,4	--	--	--
Dolomita	--	--	14,4	--	--	--	21,8	--	0,6	--	--	--
Dolomítico oversized	--	--	14,4	--	--	--	1,8	--	--	--	--	--
Dolomita reemplazando Q	--	--	0,4	--	--	--	3,0	--	8,5	--	--	--
Dedolomita	--	--	--	--	--	--	1,8	--	22,6	--	--	--
Dedolomita oversized	--	--	--	--	--	--	--	--	6,8	--	--	--
Porosidad	19,5	25,3	0,8	16,3	19,5	13,7	0,2	11,1	0,4	17,4	16,2	15,0
Intergranular	17,8	24,6	0,4	15,6	19,5	13,7	0,2	11,1	0,4	17,0	15,8	15,0
Fractura en Q	1,6	0,8	--	0,8	--	--	--	--	--	0,4	0,4	--
Oversized	--	--	0,4	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Volumen granular (%)	75,6	70,3	64,6	73,6	80,5	76,5	69,1	82,0	72,2	82,4	83,8	74,7
Matriz (%)	--	--	--	2,0	--	2,9	--	--	--	0,2	--	--
Porosidad 1ª (%)	17,8	24,6	0,4	15,6	19,5	13,7	0,2	11,1	0,4	17,0	15,8	15,0
Porosidad 2ª (%)	1,6	0,8	0,4	0,8	--	--	--	--	--	0,4	0,4	--
Reemplazado (%)	--	--	14,8	0,6	--	--	4,8	--	15,3	--	--	--
Cementado (%)	1,23	1,78	35,0	1,8	--	4,8	30,7	0,4	27,4	--	--	3,5
Volumen intergranular (%)	24,4	29,7	35,4	26,4	19,5	23,5	30,9	18,0	27,8	17,6	16,2	25,3
Tamaño de grano	0,25-05	0,25-05	0,25-05	0,25-05	0,125-0,5	0,125-0,5	0,25-1	0,25-0,5	0,125-2	0,25-0,5	0,25-1	0,25-0,5
Esfericidad	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE
Redondez	MR	MR	MR	MR	MR	MR	R	MR	R	MR	MR	MR
Selección	B	MB	M	MB	MB	MB	MB	MB	M	B	MB	MB

MB.: Muy bien seleccionado, B.: Bien seleccionado, M.: Moderadamente seleccionado
MR.: Muy redondeado, R.: Redondeado, AE: Alta esfericidad.

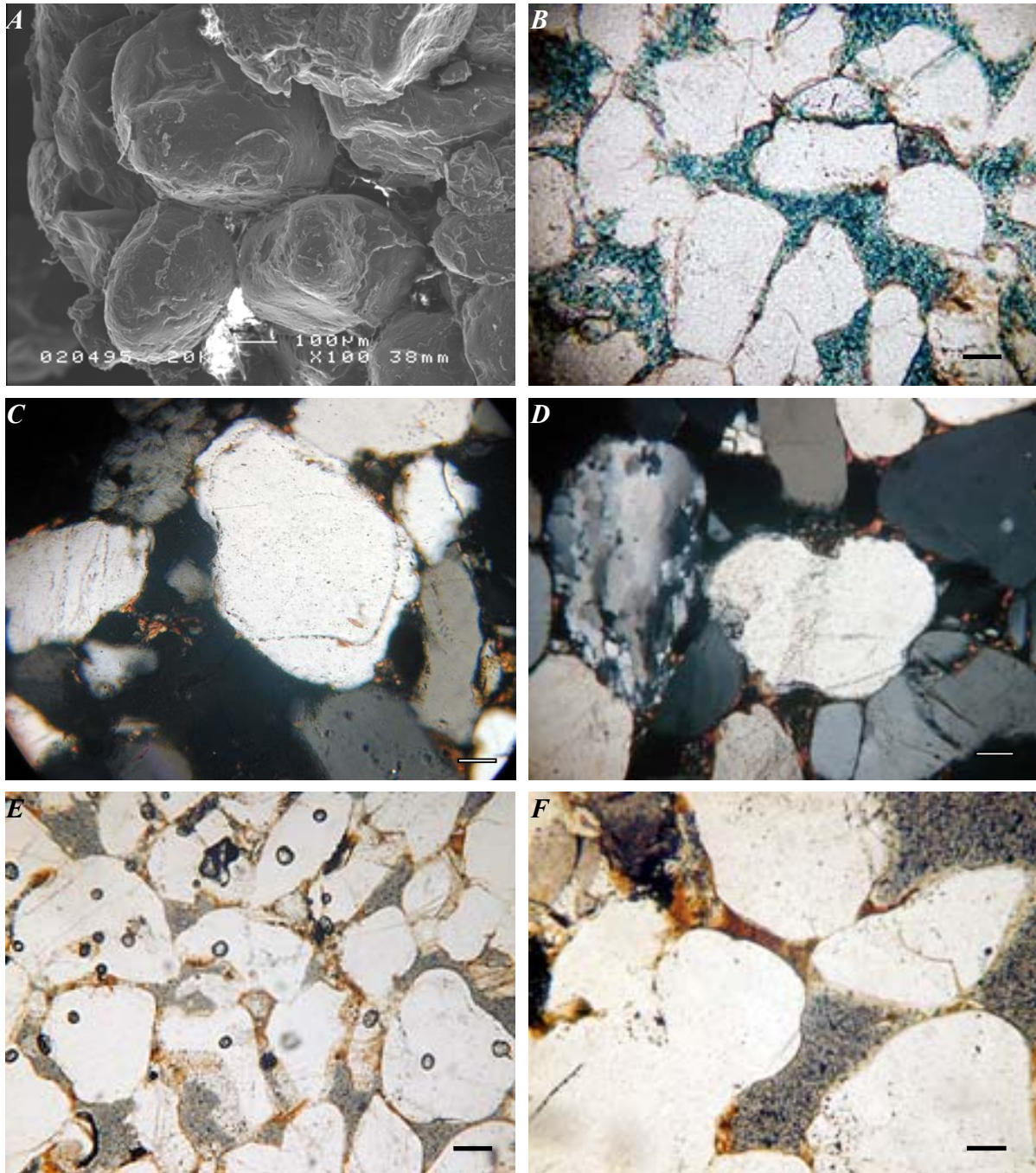


Fig.VI.7. Aspecto al microscopio de los diferentes componentes de las areniscas de la unidad superior de la formación Fortuna. (A) Detalle en el microscopio electrónico de la textura de los granos del esqueleto (buena selección y bien redondeados) y de la forma de los poros. (B) Aspecto en el microscopio óptico de los granos de cuarzo del esqueleto con contactos concavo-convexos y del alto porcentaje de porosidad intergranular (color azul) debido a la ausencia de cemento y matriz. Escala 200 μm . (C) En el centro, cuarzo monocristalino con cemento syntaxial heredado y en la parte superior izquierda grano de feldespato potásico. Escala 400 μm . (D) A la izquierda, cuarzo policristalino de origen metamórfico entre diversos cuarzoes monocristalinos. Escala 400 μm . (E) Aspecto de la matriz arcillosa de infiltración (color marrón) rodeando y formando meniscos entre los granos del esqueleto. Escala 200 μm . (F) Detalle de las arcillas de infiltración mostrando texturas iluviales. Escala 400 μm .

porcentajes mucho más bajos, el cuarzo policristalino de textura gruesa (2'8-5'9%, T. inferior; 4'5-5'6%, T. intermedio; 1% T. superior), el cuarzo metamórfico (0-2'6%, T. inferior; 2'1%, T. intermedio y 0'6% T. superior), el cuarzo policristalino de textura fina (0-1'2%) y el cuarzo con extinción ondulante tanto monocristalino (0-7'9%) como policristalino (0-3'1%).

Mención a parte merecen los granos de cuarzo que presentan un cemento sintaxial. Este sobrecrecimiento posee casi siempre texturas bien redondeadas por lo que se ha considerado como un cemento heredado y, por lo tanto, reciclado del área fuente (Fig. VI.7C). Su contenido parece que muestra una ligera disminución hacia el techo de la serie (0'4-3'4%, T. inferior; 0-1'4%, T. intermedio y 0'6% T. superior).

Hay que destacar la presencia de posibles bioclastos en las muestras K-13 y K-15 que corresponden a las dos capas bien cementadas del techo del tramo inferior.

VI.3.2. LA MATRIZ:

A lo largo de la serie, en general, las areniscas estudiadas presentan poca matriz (0-7'3%). No obstante, y a pesar de este bajo contenido, se pueden distinguir dos tipos bien diferenciados en base a su textura y mineralogía: la matriz arcillosa y la siliciclástica. La matriz arcillosa recubre los granos del esqueleto con texturas claras de iluviación o infiltración (Fig. VI.7E y F) y su mineralogía es del tipo esmectita o incluso interestratificado illita-esmectita aunque también aparece caolinita (Fig. VI.8). Las muestras con mayores porcentajes de arcillas (6'3-6'8%) adquieren un color más anaranjado y se encuentran en los tramos de la serie con capas lutíticas interestratificadas. También se ha detectado la presencia (0'6%) en una muestra del nivel 2 del tramo inferior (K-7) de epimatriz (Dickinson, 1970) producto de la transformación de los granos de feldespato a minerales de la arcilla (caolinita).

La matriz siliciclástica está constituida por pequeños granos de cuarzo (0'01-0'08 mm) muy angulosos que se encuentran diseminados entre los granos del esqueleto. Esta protomatriz aparece de forma esporádica en el tramo inferior e intermedio de la serie (0'2-2'9%) y se originaría durante el transporte por rotura de los granos del esqueleto.

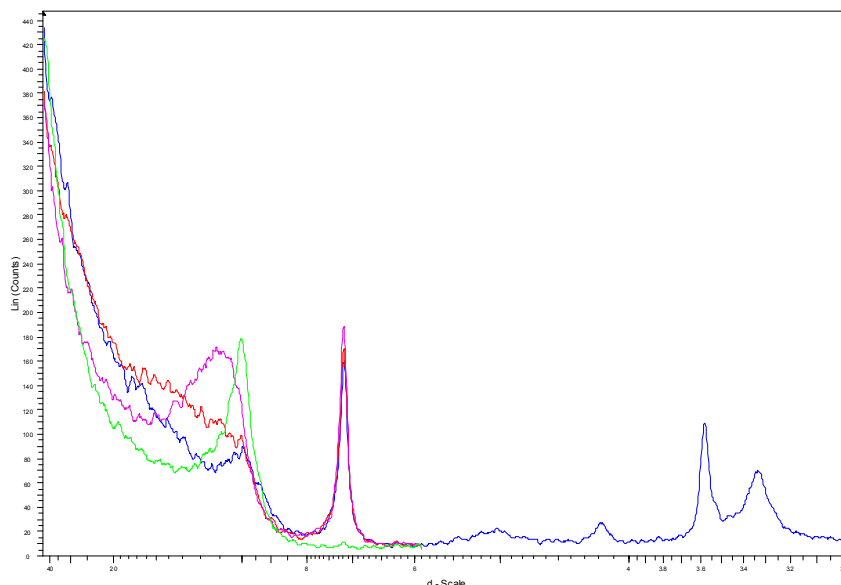


Fig. VI.8: Diagramas de rayos x sobre agregados orientados de la fracción arcillosa inferior a $2\ \mu\text{m}$ de una arenisca (muestra K-14) representativa de la unidad superior continental de la formación Fortuna. Línea roja: diagrama normal (muestra secada al aire). Línea verde: diagrama tras calcinación de 4h a 490°C . Línea rosa: diagrama tras 12h en atmósfera de hidrazina. Línea azul: diagrama tras 12h en atmósfera de etilen-glicol.

VI.3.3. LA POROSIDAD:

Estas areniscas del Mioceno continental poseen, en general, una porosidad bastante alta (11'1-25'3%) a excepción de los tres estratos que se encuentran bien cementados (0'2-0'8%). Desde el punto de vista textural existen dos tipos de porosidad. La más importante es la primaria (11'1-24'6%) que es de tipo intergranular (Fig. VI.7A y B). El otro tipo es la porosidad secundaria de fractura (0'4-1'6%) que se produce a favor de la microfracturación de los granos del esqueleto.

Se ha detectado en las muestras bien cementadas un tercer tipo de porosidad de carácter secundario generada por la disolución de ciertos granos del esqueleto, sobretodo feldespatos. Esta porosidad se encuentra casi totalmente cerrada por el crecimiento de cementos carbonáticos (calcita y dolomita).

Las observaciones realizadas mediante el microscopio óptico de polarización, electrónico y de fluorescencia permiten afirmar que el sistema poroso de estas areniscas es único y muy bien comunicado, tal como se verá en el capítulo siguiente en el apartado de descripción del sistema poroso de las areniscas procedentes de la cantera (ver capítulo VII.1.1.2).

VI.3.4. EL CEMENTO:

En general, las areniscas de la serie oligocena continental se encuentran muy poco cementadas y en ellas el crecimiento de mineralogías autigénicas se reduce a la precipitación de cemento ferruginoso (0-5'2%), bien entre los granos del esqueleto y la matriz, bien recubriéndolos. También se ha detectado la presencia esporádica de cementos carbonáticos (calcita o dolomita) que se encuentran o relleno de pequeñas fracturas milimétricas en los estratos (sobre todo en el tramo inferior) o cementando aisladamente estratos de la serie miocénica (Fig. VI.9). Concretamente, esta cementación aislada afecta a tres estratos del tramo inferior que por su mayor dureza han sido utilizados como capas de referencia a la hora de realizar las columnas estratigráficas (Figs. VI.1 y VI.3).

La secuencia de cementación se produce de manera similar en las tres capas y empieza con un cemento ferruginoso (0'8-5'2%) de características similares al descrito anteriormente.

El segundo cemento es el dolomítico (9'1-29'2%), el cual forma pequeños rombos zonados (0'03-0'07 mm) que, o bien ocupan el espacio intergranular (14'4-21'8%), o bien reemplazan componentes del esqueleto (4'8-14'8%) (Fig. VI.9A y C). Al microscopio de catodoluminiscencia los romboedros aparecen zonados con un núcleo de luminiscencia heterogénea de color naranja, seguido de una zona no luminiscente y finalmente, un borde externo, a veces doble, de fuerte luminiscencia anaranjada (Fig. VI.9B y D).

El tercer cemento es la calcita esparítica (0'4-15'4%) que forma cristales (0'05-0'4 mm) en la porosidad primaria residual o bien a favor de fracturas secundarias que afectan al conjunto de la roca o en microfracturas que afectan individualmente a los granos del esqueleto (Fig. VI.9A). En la mayoría de los casos, esta calcita es no luminiscente o tiene una ligera luminiscencia de color naranja (*dull*) (Fig. VI.9B). Aún así, en la muestra K-13 se ha observado dos generaciones diferentes de calcita. Una primera que rellena porosidad intergranular y localmente *oversized* que mayoritariamente es no luminiscente, aunque empieza con una pequeña zonación en contacto con la dolomita. Y una segunda que rellena la porosidad residual y las microfracturas de luminiscencia *dull* anaranjada.

El cuarto cemento es la dedolomita (0-29'4%) el cual aparece sólo en los dos estratos del nivel 3 del tramo inferior (K-13 y K-15; 1'8 y 29'4% respectivamente). Concretamente, es en el estrato más superior de este tramo (K-15), que ha sido denominado como capa guía, donde adquiere el mayor porcentaje (29'4%) coincidiendo con el menor contenido en dolomita (9'1%) y

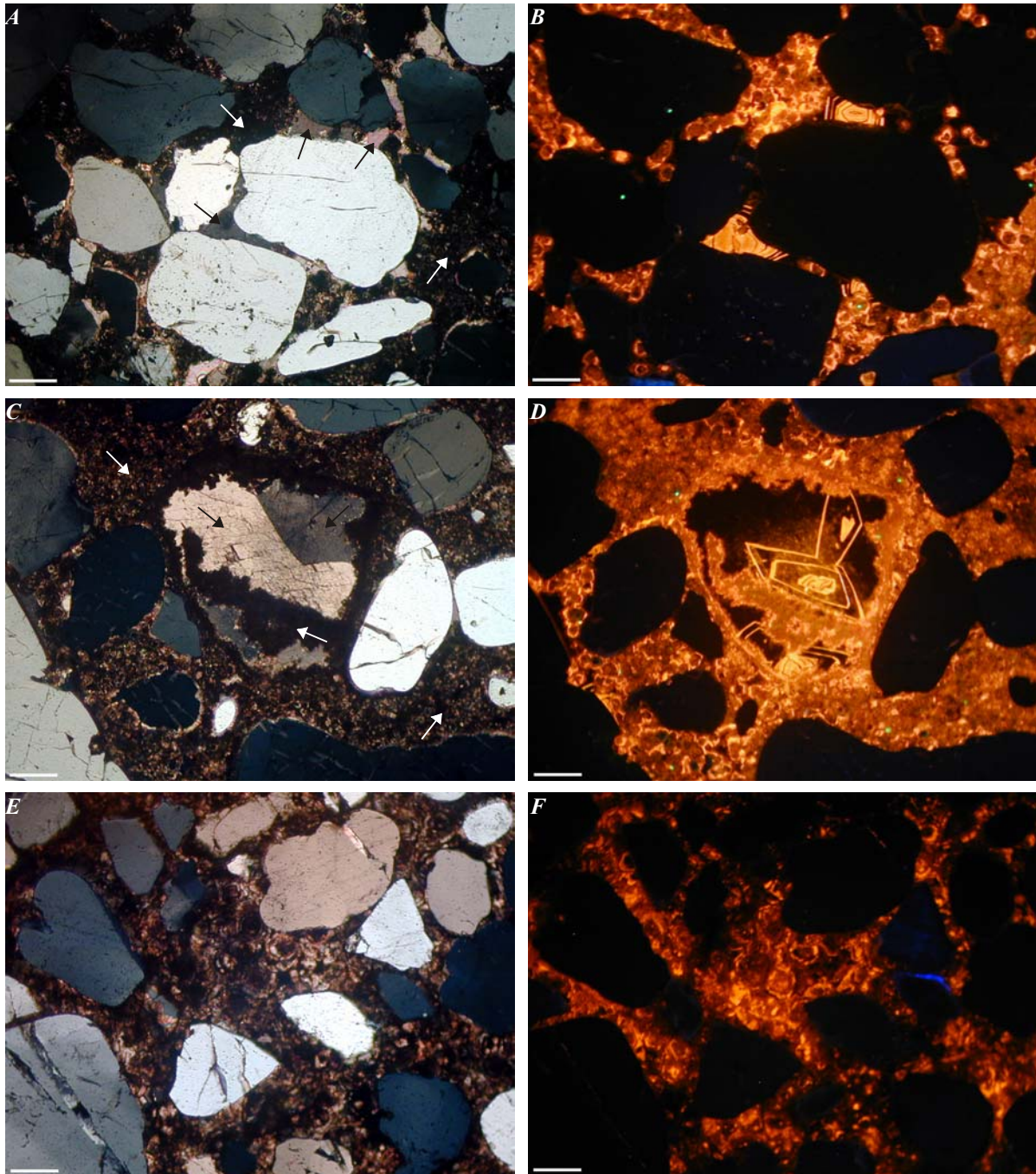


Fig.VI.9.- Aspecto de los cementos carbonáticos al microscopio de polarización y de catodoluminiscència. (A) Cementos intergranulares de dolomita (flecha blanca) y de calcita (flecha negra). (B) Imagen anterior en catodoluminiscència, donde se ve la zonación tanto en los romboedros de dolomita como en la calcita. (C) Cemento intergranular de dolomita (flecha blanca) y porosidad oversized rellena por cemento de dolomita (flecha blanca) y calcita (flecha negra). (D) Imagen anterior en catodoluminiscència con ambos cementos zonados. (E) Cemento intergranular de dedolomita. (F) Imagen anterior en catodoluminiscència donde se observa que la dedolomita conserva el carácter zonado de la dolomita original. Escala gráfica: 200 μ m.

de calcita (0'4%) de los tres estratos. Al igual que el cemento dolomítico, la dedolomita se encuentra, bien ocupando la porosidad intergranular (22'6%) bien reemplazando granos del esqueleto (6'8%) (Fig. VI.9E). En catodoluminiscència, la dedolomita presenta las mismas características y colores que la dolomita (Fig. VI.9F).

VI.3.5. DIAGÉNESIS:

En el diagrama de Housecknecht (1984) se representa el porcentaje de volumen intergranular vs. Porcentaje de cemento en la arenisca. Según este diagrama, la mayoría de las muestras han quedado proyectadas en el área donde la compactación es superior a la cementación, exceptuando las tres muestras de las capas dolomitizadas (K-6, K-13 y K-15), lo que indica que las areniscas de la serie han perdido gran parte de su volumen intergranular inicial por compactación. Si tenemos en cuenta que las muestras de areniscas poco cementadas presentan un menor volumen intergranular (16'2-29'7%) con respecto a las muy cementadas (27'8-35'4%) y asumiendo que todas las areniscas de la serie miocénica poseen unas características texturales similares (areniscas maduras con alrededor de un 40% de volumen intergranular inicial) y que han sido sometidas a un mismo enterramiento se puede

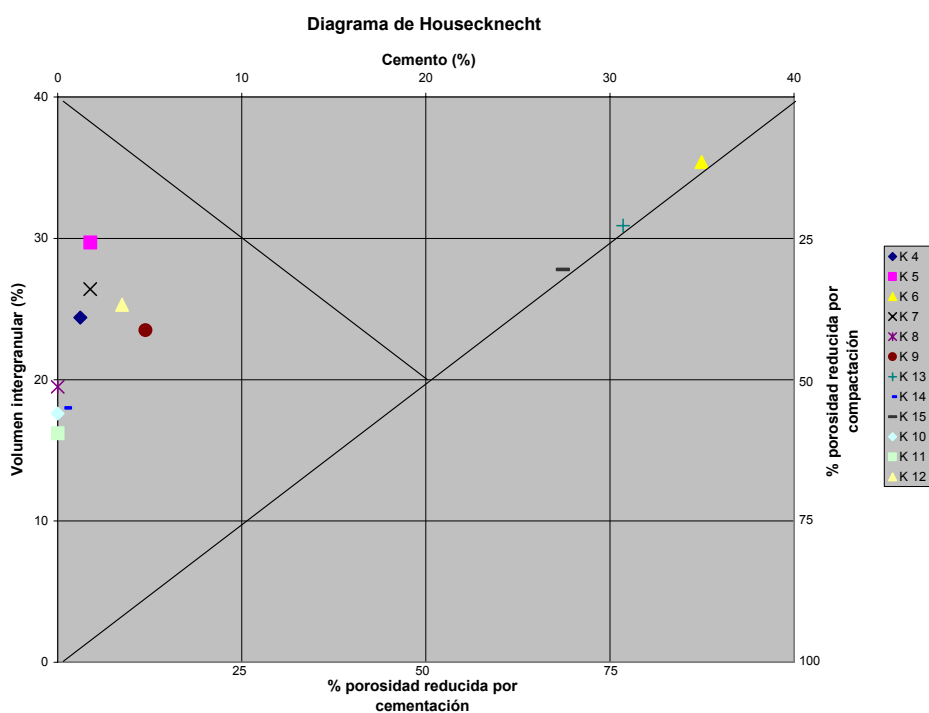


Fig. VI.9: Relación % cemento-% volumen intergranular (según Housecknecht, 1987).

concluir, que los cementos carbonáticos han inhibido en gran medida los efectos de la compactación de estos estratos y por lo tanto, son anteriores a ésta. De esta forma, la cementación es de carácter superficial y relativamente temprana.

La compactación que han sufrido estos sedimentos es de dos tipos, mecánica y química. La mecánica produjo una reorganización de los granos del esqueleto, que redujo considerablemente el volumen intergranular, y la aparición de una microfracturación en los granos que creó algo de porosidad secundaria (0-1'6%). Posteriormente, con la compactación química aparecieron contactos entre los granos cóncavo-convexos (1-5'7%) debidos a los efectos de la presión-disolución. Como se verá en el capítulo siguiente (VII.1.1.1.2) se ha podido calcular el volumen intergranular perdido por compactación, el cual oscila entre un 10,9% y un 16,3% (Tabla VII.2). Esta variación depende sobretodo, del tamaño de grano (las areniscas finas se compactan más químicamente al aumentar el número de contactos y la superficie de presión-disolución)) y en menor medida de la selección (las arenas peor seleccionadas se compactan más mecánicamente) ya que las variaciones en la selección son muy poco significativas.

La historia diagenética que han sufrido estas areniscas comienza con la precipitación de un cemento ferruginoso muy temprano que deja una fina película sobre los granos del esqueleto y de la matriz (arcillosa y siliciclástica).

A continuación y sólo en algunos estratos de la serie oligocena continental, precipita dolomita en forma de romboedros zonados conjuntamente con óxidos de Fe. Estas zonaciones corresponden a variaciones de Mn y Fe indicando oscilaciones en la composición química del fluido durante la precipitación de la dolomita (cambios del carácter oxidante-reductor).

En estos estratos la cementación prosigue con la precipitación de calcita en dos generaciones. La primera es precompactacional y ocupa la porosidad intergranular residual. Este cemento comienza con una banda zonada donde alternan zonas ricas y pobres en Mn y Fe debido a que el fluido precipitante está en contacto con la dolomita y se enriquece en estos elementos. A medida que la dolomita se aísla debido a la precipitación de calcita el fluido se empobrece en Mn y Fe, formándose la calcita no luminiscente. La segunda generación es posterior a la compactación ya que el cemento de calcita ocupa la porosidad de fractura. Esta calcita es pobre en Mn y Fe por lo que debe precipitar a partir de un fluido más oxidante que el anterior.

La dedolomitización se produjo durante la precipitación de los cementos de calcita sin poder precisar más. Como el reemplazamiento de calcita ha preservado la zonación de la

dolomita indica que el mecanismo de formación de la dedolomita es la disolución-precipitación simultánea.

En la mayoría de los estratos de la serie no hay cementación carbonática, por lo tanto, la historia diagenética en ellos, después del cemento ferruginoso prosigue con la compactación mecánica y química que produce la aparición de microfracturas y contactos de presión-disolución que son los causantes de la litificación parcial de la roca. Según McBride et al. (1991) el inicio de la presión-disolución se produce a unos 900 m de profundidad, lo que parece indicar que el enterramiento máximo que han sufrido estas areniscas se acercaría a esta profundidad.

VI.3.6. PROCEDENCIA:

Atendiendo a las paleocorrientes obtenidas y a las direcciones estructurales principales de la cuenca los sedimentos detríticos fueron suministrados a esta región desde áreas fuente situadas en el SW de Túnez y casi con toda seguridad, el área de procedencia principal para esta unidad superior de la formación Fortuna fue la plataforma sahariana. Teniendo en cuenta, las diferentes categorías de granos y fragmentos de roca reconocido se puede afirmar que esta área fuente estaba caracterizada por diferentes litologías. Las sedimentarias, fundamentalmente estaban representadas por areniscas cementadas por cuarzo que podrían proceder de las areniscas paleozoicas del Tassilis o de las areniscas cretácicas del “continental intercalaire” o bien de las areniscas eocenas. Las litologías plutónicas y metamórficas probablemente procedían del macizo de Hoggar. El reciclaje de las litologías sedimentarias, como indica la presencia de cuarzos con cementos sintaxiales heredados, junto con el transporte fluvial permite explicar en parte el alto contenido en cuarzo de las areniscas de esta formación pero no su extrema madurez. Este hecho lleva a pensar que las litologías del área fuente o parte de las mismas, estaban afectadas por un manto de alteración (saproilito) que o bien era erosionado por la red fluvial miocena o bien era reciclado a través de las formaciones sedimentarias premiocenas. De este manto de alteración también procederían los minerales de la arcilla reconocidos en la serie. El carácter detrítico heredado de estos minerales indicaría que el área fuente estuvo en algún momento bajo la influencia de climas cálidos y húmedos o estacionales que produjera la alteración de los minerales más vulnerables químicamente de las diferentes litologías.