

Algunas singularidades geológico-geotécnicas de la Línea ferroviaria de Alta Velocidad Madrid-Valencia

Any geological-geotechnical singularities of the High Speed Railway of Madrid-Valencia track

Luis Serrano Martín. Geólogo. Ingeniero Técnico de Obras Públicas
Jefe de Gabinete de Geología y Geotecnia. Dirección de Estudios. Dirección de Estudios y Proyectos.
Dirección General de Grandes Proyectos. ADIF. Madrid (España). rop@ciccp.es
Manuel Lombardero Barceló. Geólogo
Jefe del Departamento de Geología. INECO. Madrid (España). rop@ciccp.es
Joan Santamaria Casanovas. Dr. Geología Aplicada.
Geólogo Consultor. Sabadell (España). rop@ciccp.es

Resumen: Los proyectos constructivos de la Línea Ferroviaria de Alta Velocidad Madrid-Valencia discurren sobre seis grandes unidades geológicas: Cuenca de Madrid, Sierra de Altomira, Depresión Intermedia o Cuenca de Loranca, Rama Castellana de la Cordillera Ibérica, Cuenca del Cabriel y Cubeta Valenciana. La edad geológica de los materiales atravesados va del Triásico al Cuaternario reciente y su litología es muy variada: calizas y dolomías, lutitas, areniscas, arcillas y margas, yesos y otras sales, depósitos aluviales de arenas y gravas... La estructura es también cambiante, pasando de estratos subhorizontales en las cuencas sedimentarias post-Alpinas a capas fuertemente plegadas, fallas, cabalgamientos y otras estructuras complejas en la Cordillera Ibérica, la Sierra de Altomira y la Cuenca del Cabriel. La problemática geológico-geotécnica, por tanto, también es compleja, destacando el proyecto y la construcción de un túnel en sales sódicas y cálcicas solubles.

Palabras Clave: Geología; Geotecnia; Cuenca de Madrid; Sierra de Altomira; Cordillera Ibérica; Ferrocarril Alta Velocidad

Abstract: The construction projects of Madrid-Valencia High Speed Railway Track runs on six mayor geological units: Madrid Basin, Altomira Heights, Intermediate Basin, Castillian Branch of the Iberian Range, Cabriel Basin and Valencia Basin. The age of the geological formations is Triassic to recent Quaternary, and the lithology of formations includes limestones, dolomites, shales, sandstones, clays, marls, gypsum and other salts, alluvial gravel and sand deposits... The geological structure is also varied, sub-horizontal layers in basins, high-angle dipping layers, folds, faults, thrusts, and other structures in Altomira and Iberian Ranges. They lead to many also varied geological and geotechnical problems, as tunnelling trough a soluble sodium-calcium salt massif.

Keywords: Geology; Geotechnics; Madrid Basin; Altomira Heights; Iberian Range; High Speed Railway

Entorno geológico de la L.A.V. Madrid- Valencia

La Línea de Alta Velocidad (L.A.V.) Madrid-Valencia tiene su origen aproximado en el PK 28+000 de la L. A. V. Madrid-Sevilla. Se inicia con un tramo de conexión de unos 3.166 m desde el que ya sigue con vía doble. Con una longitud de unos 360,6 km, los Proyectos de Construcción de Plataforma se estructuraron en 36 tramos de longitudes variables, en función de su dificultad, y que se especifican en la tabla

adjunta (1)(2). En general, de forma previa a su inicio, se realizaron sendos estudios geológico-geotécnicos para documentar los proyectos y establecer su viabilidad.

Inicialmente, el trazado se dirige hacia el Sur hasta Aranjuez y posteriormente gira para tomar la dirección Oeste-Este hacia Cuenca, donde se instala la estación. Nuevamente se dirige hacia el Sur para sortear la Cordillera Ibérica hasta encontrar un paso para dirigirse al Este hasta Valencia.

PROYECTOS CONSTRUCTIVOS LAV MADRID VALENCIA

Tramos		Longitud	Pasos Sup.	Pasos Inf.	Pérgolas	Muros	Viaductos	Túneles art.	Túneles	Actuación Singular
CUENCA DE MADRID	Depresión Tajo	1 TORREJÓN DE VELASCO-SESEÑA	15.420	14	5	1	5	1	2	
		2 SESEÑA-ARANJUEZ	8.620	6	2		1	2	1	Túnel de la Dehesa Nueva del Rey - Viaducto del Tajo
	3 ARANJUEZ-ONTIGOLA	4.700	2				1	2	1	Túnel del Regajal
	4 ONTIGOLA-OCAÑA	7.429	5	2		1	1	1		
	5 OCAÑA-VILLARRUBIA	21.520	10	5			2	1		
	6 VILLARRUBIA-SANTA CRUZ	9.792	2	6	1			1		
	7 SANTA CRUZ-TARANCÓN	11.668	11							
	8 TARANCÓN-UCLÉS	15.400	9	7			1			
Sierra Altomira	9 UCLÉS-CAMPOS DEL PARAISO	8.353	2	6				2	1	Túnel Sierra Altomira
Depresión intermedia o Cuenca de Loranca	10 CAMPOS DEL PARAISO-HORCAJADA	19.680	8	12			5			Viaducto río Cigüela
	11 HORCAJADA-TORREJONCILLO	8.580	2	1			3	2	1	Túnel de Horcajada
	12 TORREJONCILLO-ABIA DE LA OBISPALÍA	6.910	1	1		6	4	2		Viaducto Las Higuieruelas
	13 ABIA DE LA OBISPALÍA-CUENCA	6.470		3			1	3	1	Túnel de Cabrejas
Rama castellana de la Cordillera Ibérica	14 CUENCA-OLALLA	10.860	5	1			4	2	1	Túnel del Carrascal - Viaducto del Júcar
	15 OLALLA-ARCAS DEL VILLAR	10.619	2	5			1	2	1	Túnel de El Bosque
	16 ARCAS DEL VILLAR-FUENTES	12.420	3	4			1	4	1	Yacimiento paleontológico Lo Hueco
	17 FUENTES-MONTEAGUDO DE LAS SALINAS	10.960	9	18			1		1	Túnel Los Cubillos
	18 MONTEAGUDO-MONTEAGUDO (TÚNEL DE TENDERO)	4.960	1	1					1	
	19 MONTEAGUDO DE LAS SALINAS-SOLERA DE GABALDÓN	11.680	6	3			2			
	20 SOLERA DE GABALDÓN-MOTILLA DEL PALANCAR	13.340	8	6	1	2	1			Desvío a/de Albacete
	21 MOTILLA-INIESTA	14.920	5	5			4			
	22 INIESTA-MINGLANILLA	13.600	3	2			5			
	23 MINGLANILLA-EMBALSE DE CONTRERAS	7.900	4	1		1	3	4	2	Viaductos del Redonillo y Huerta de Mateo
24 EMBALSE DE CONTRERAS-VILLARGORDO DEL CABRIEL	6.524	1			2	3	7	3	Viaducto Embalse de Contreras - Viaducto del Istmo	
Cuenca del Cabriel	25 VILLARGORDO DEL CABRIEL-VENTA DEL MORO	9.502	2	4	1			2	1	Túnel Villargordo
	26 VENTA DEL MORO-CAUDETE DE LAS FUENTES	9.290	5	3			2			
	27 CAUDETE DE LAS FUENTES-SAN ANTONIO DE REQUENA	10.000	7	2			3			Viaducto río Magro
	28 SAN ANTONIO DE REQUENA-REQUENA	17.178	11	5			2			
Entronque con la Cordillera Bética	29 REQUENA-SIETE AGUAS	6.800	5	2			2	3	1	
	30 SIETE AGUAS-BUÑOL	11.208		1			2	3	3	Túnel de la Cabrera (2 tubos)
	31 BUÑOL-CHESTE	9.740	2	1	2		5	1		
Cubeta Valencia	32 CHESTE-ALDAYA	12.389	6	6			4			
	33 ALDAYA-PICANYA	6.317	3	2			2		1	Túnel artificial de Torrent
	34 PICANYA-VALENCIA	1.800		2						
	35 CONEXIÓN JÁTIVA-VALENCIA CON NUDO SUR	2.360			2		4			
	36 RED ARTERIAL DE VALENCIA. NUDO SUR	1.706	1	1	1	2		5		
TOTAL		360.615	161	125	9	20	72	49	21	

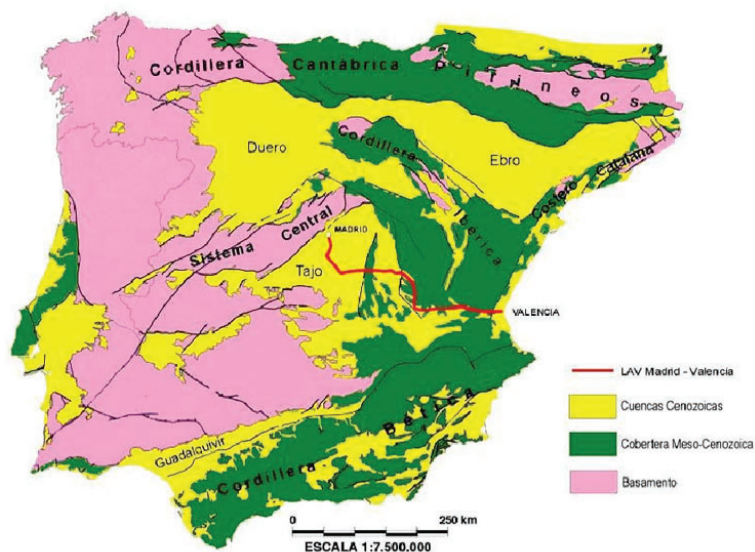


Fig. 1. Unidades geológicas de la península Ibérica (Modificado de (3)). En rojo el trazado de la L.A.V. Madrid-Valencia.

Como puede verse en el mapa geológico general de la figura 1 (3), el trazado atraviesa 6 grandes unidades geológicas: la Cuenca de Madrid (perteneciente a la Cuenca Cenozoica del Tajo), la Depresión Intermedia o Cuenca de Loranca, la Sierra de Altomira (cuyo levantamiento individualizó ambas cuencas), la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica, la Cuenca del Cabriel (el entronque de la Cordillera Ibérica con la Bética) y la Cubeta Valenciana.

La L.A.V. Madrid-Valencia, discurre en su totalidad sobre terrenos sedimentarios pertenecientes al denominado Ciclo Alpino. Estos sedimentos fueron depositados posteriormente a la erosión de la Cordillera Hercínica a finales del Paleozoico, cuyas "raíces" formadas por rocas metamórficas e ígneas afloran extensamente en la mitad occidental de la península, el Pirineo y la Cordillera Costera Catalana, constituyendo el zócalo o basamento varisco de la Península Ibérica. La sedimentación

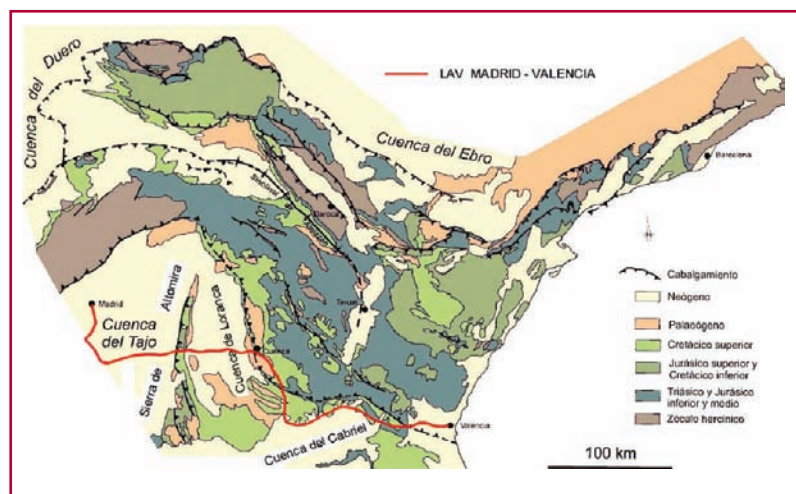


Fig. 2. Esquema estructural de la Cadena Ibérica y trazado de la L.A.V. Madrid-Valencia (Modificado de (3)).

durante el Ciclo Alpino estuvo controlada por diversas fases de la Orogenia Alpina, que obedeció al giro relativo de la sub-placa Ibérica con respecto a la placa Euro-Asiática y que durante el Mesozoico y el Paleógeno se tradujo en movimientos de bloques que generaron aéreas levantadas y hundidas, donde se depositaron tanto sedimentos continentales como marinos, y que culminaron en el Neógeno con la fase principal de la Orogenia, que produjo el levantamiento de las cadenas montañosas que aún hoy conforman el relieve de Iberia.

La sismicidad que afecta a la península corresponde en su gran mayoría a movimientos de fallas generadas durante la Orogenia, algunas de las cuales hoy en día continúan activas. La mayor parte del trazado proyectado en esta línea discurre sobre terrenos de baja sismicidad.

En la figura 2 (3) se representan las unidades geológicas por las que discurre la L. A. V. Madrid-Valencia.

Cuenca de Madrid

Es una cuenca intra-placa, en que la estructura de sus márgenes está condicionada por los esfuerzos que afectaron al margen de la Placa Ibérica durante los movimientos alpinos y cuya morfología actual corresponde a la fase principal miocena de la Orogenia Alpina. Se encuentra rellena por sedimentos de ambiente continental del Paleógeno, Neógeno y Cuaternario.

El Paleógeno (en sentido amplio, ya que se incluye al Cretácico terminal) está formado por dos unidades, una inferior de edad Cretácico superior-Eoceno y otra superior con tres subunidades, una constituida por caliza y margas lacustres, otra esencialmente detrítica y la

superior con lutitas rojas y niveles de areniscas y conglomerados. El Neógeno se dispone en discordancia angular y erosiva sobre los materiales paleógenos en las zonas marginales de la cuenca, mientras que en su centro se encuentra en conformidad estratigráfica. Dentro del Mioceno se pueden distinguir tres unidades alcanzando un espesor de más de 500 m. La Unidad Inferior (o *Unidad Salina Inferior*) presenta sedimentos de facies lacustre, y constituyó una cuenca endorreica cerrada hasta el Mioceno medio.

Su parte central tiene naturaleza evaporítica, y está formada por sulfatos cálcicos y sódicos y cloruros (yeso, anhidrita, glauberita-thenardita-mirabilita, halita y otras sales) precipitados en un lago salino en clima árido, que proceden del reciclado de formaciones evaporíticas mesozoicas y paleógenas. La *Unidad Intermedia* representa la irrupción de depósitos detrítico-yesíferos sobre los materiales salinos durante el Mioceno medio. Su composición litológica sigue estando controlada por las sierras que forman los márgenes de la cuenca, los provenientes del norte y sur son predominantemente arcósicos (proceden de rocas ígneas y paleozoicas silíceas), que distalmente pasan a paleosuelos carbonáticos y arcillas verdosas (Peñuela), ricas en magnesio (sepiolitas y esmectitas). Las facies lacustres varían; en el S y E se formaron yesos y hacia el NE carbonatos (Caliza del Páramo), sobre los cuales se desarrolló un importante sistema kárstico que condicionó la posterior implantación de un sistema fluvio-lacustre en la *Unidad superior* durante el Mioceno superior

Sierra de Altomira

De relieve moderado (1.180 m), se sitúa en el borde oriental de la Cuenca de Madrid y por el E limita con la Depresión Intermedia. Es una alineación de afloramientos mesozoicos, de litologías fundamentalmente carbonatadas de edad Jurásico-Cretácico que pertenecen al dominio estructural de la Cordillera Ibérica, fracturados y fuertemente deformados con una marcada vergencia de los cabalgamientos y pliegues asimétricos hacia el O. Presenta una deformación de tipo compresiva, con pliegues y cabalgamientos imbricados de direcciones N-S a NO-SE, producidos a partir de niveles de despegue localizados en las *Facies Keuper* del Triásico superior (figura 3 (4)). El frente de cabalgamiento tiene un salto vertical de más de 1.500 m respecto a la cobertura mesozoica indeformada, y afecta exclusivamente

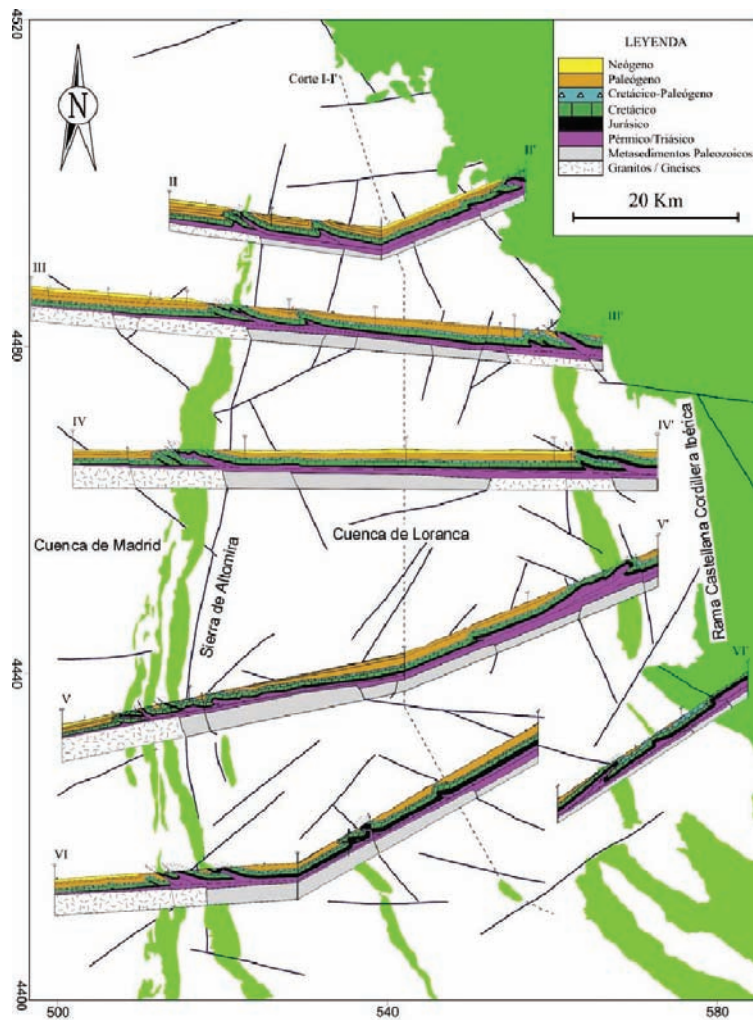


Fig. 3. Cortes geológicos seriados desde la Cuenca de Madrid a la Cadena Ibérica, donde se aprecian los cabalgamientos (extraído de (4)).

a la cobertera mesozoica y terciaria. El acortamiento se calcula entre 7 y 16 km.

Los materiales paleógenos se presentan bordeando la Sierra de Altomira, adosados y recubriendo la estructura anticlinal de Carrascosa del Campo, e iniciando el relleno de la Depresión Intermedia. Existe discordancia entre sus diversas formaciones y entre éstas y el sustrato cretácico. Los ejes de los pliegues llevan la dirección general Ibérica, con buzamientos de unos 25°, pero que aumentan en las zonas de cabalgamientos existentes en el flanco oeste del anticlinal de Carrascosa.

Depresión Intermedia

Al igual que la Cuenca de Madrid, es fruto de la etapa distensiva post-alpina de finales del Mioceno

tras el levantamiento de la Sierra de Altomira, con fracturas profundas que provocaron la formación de cubetas sedimentarias independientes a ambos lados. Se encuentra rellena por depósitos detríticos terciarios, que estuvieron controlados por el régimen tectónico que condicionó las características hidrogeológicas, dando lugar a una cuenca endorreica de gran profundidad donde la sedimentación y la subsidencia tectónica eran simultáneas. Constituyó una zona lacustre, con sedimentación química o mixta, rodeada y alimentada por abanicos aluviales, procedentes mayoritariamente del dominio Ibérico, y predominio de sedimentación detrítica.

Los sedimentos terciarios se agrupan en 6 unidades litoestratigráficas discordantes, separadas por rupturas sedimentarias representadas por erosión total o parcial de la secuencia subyacente. Su disposición subhorizontal da lugar a un relieve suave y alomado que culmina en formas de mesa en los paquetes carbonatados superiores, generalmente inclinados o basculados hacia el E.

Su *Unidad Basal* paleógena está compuesta por lutitas yesíferas verde-gris y yeso nodular sacaroideo que pasa lateralmente a areniscas y lutitas abigarradas con dolomías carniolares. La *Unidad Detrítica Inferior* está compuesta por conglomerados y areniscas, lutitas y calizas, como depósitos de canal, de llanura de inundación y lacustres. La *Unidad Detrítica Superior* corresponde a facies fluvial, depositada sobre una discordancia con paleorelieve. La forman conglomerados, areniscas, lutitas, yesos y abundante materia orgánica y capas de lignito.

Las unidades del Neógeno son discordantes en los márgenes y paraconformes en el centro. Están compuestas por varios ciclos; el primero son depósitos de abanico aluvial gradando a una zona lacustre central, el segundo con predominio de carbonatos sobre sulfatos y el tercero lo forman calizas lacustres, "calizas del páramo".

Rama Castellana de la Cordillera Ibérica

Limita al N con la Cuenca del Ebro y al O y SO con la Depresión Intermedia y el Antepaís Manchego. Hacia el NO enlaza con el Sistema Central. El edificio orogénico involucra la cobertera mesozoica y cenozoica y al zócalo varisco, a excepción de las unidades externas más meridionales como la Sierra de Altomira. La Orogenia Alpina produjo un engro-

samiento cortical debido a los cabalgamientos. El estilo tectónico es de zócalo y cobertera.

La estructura general es un anticlinorio orientado NO-SE con numerosos pliegues y cabalgamientos de escala kilométrica. En todo su recorrido son característicos los pliegues en caja, formados por dos pliegues sinclinales o anticlinales de vergencia contraria, con un flanco subhorizontal y otro subvertical. En algunas estructuras anticlinales aparecen materiales mesozoicos según la dirección ibérica (NO-SE) que constituyen los relieves dominantes. El posterior encajamiento de la red fluvial ha producido los desniveles topográficos más acusados.

El recorrido de la L. A. V. afecta a materiales mesozoicos del Triásico en *Facies Keuper*, con arcillas versicolores, yesos y calizas del Muschelkalk. El Jurásico presenta una serie carbonatada marina con coniolas, dolomías, calizas, calcarenitas y margas. El Cretácico inferior es de naturaleza litoral somera-continental, fundamentalmente detrítica, con arenas, areniscas y arcillas con algún nivel calcáreo y los materiales arenosos de la *Facies Utrillas* con arcillas caoliníferas. El Cretácico superior presenta arcillas verdes, expansivas, y una sucesión de dolomías, calizas y margas de origen marino.

El límite Mesozoico-Cenozoico lo constituye la *Facies Garum*, discordante sobre el Mesozoico, que corresponde a ambiente continental, salobre y árido. La forman niveles de arcillas y margas verdosas con yesos y anhidrita, niveles de yesos alabastrinos, calizas dolomíticas karstificadas y conglomerados y areniscas silíceas y calizas oquerosas. También en discordancia aparecen los materiales del Eoceno-Oligoceno, con canales de conglomerados y areniscas grises, le siguen arenas y arcillas rojizas plásticas y finalmente areniscas y argillitas.

Cuenca del Gabriel

Constituye el extremo suroriental de la Cordillera Ibérica, en su enlace estructural con la zona más externa de la Cordillera Bética (Prebético). Es la zona de mayor complejidad estructural al presentar cabalgamientos de dirección ONO-SES, con desplazamientos SSO, y varios sistemas de fallas, con fosas o sinclinales rellenos de materiales terciarios. Su origen puede estar ligado a la formación de una amplia depresión por procesos de extensión postdiapirismo y disolución de evaporitas triásicas.

Los sedimentos mesozoicos, formados por calizas jurásicas y calizas dolomitizadas con margas y dolomías cretácicas, se encuentran afectados por una tectónica de directriz ibérica con grandes pliegues y fracturas NO-SE, con vergencia al SO.

Los materiales terciarios, de disposición subhorizontal, o con suaves pliegues sinclinales en correspondencia con las cubetas o fosas intramesozoicas, presentan una gradación desde el borde a las facies centrales. De niveles de conglomerados calcáreos desarrollados sobre el sustrato mesozoico se pasa a arcillas arenosas y margosas con niveles de conglomerados de la facies intermedia, y finalmente a la facies central, con argillitas rojizas y areniscas. Son frecuentes las costras calcáreas. Aparecen facies detríticas rojas de origen continental y depósitos calizos y margocalizos miocenos, arcillas y lutitas rojas con encostramientos pliocenos, y un recubrimiento cuaternario formado por costras carbonatadas, travertinos, limos, arenas y gravas de origen aluvial.

La Cubeta Valenciana o Surco de Valencia

La depresión costera valenciana es la parte visible de una estructura extensiva mucho más amplia que está oculta bajo las aguas del Mediterráneo. Se originó por extensión a consecuencia de la convergencia África-Eurasia, y supuso la ruptura del E de la Subplaca Ibérica. La corteza tiene en esta zona solamente 16 km de espesor, en contraposición con el espesor medio en la Subplaca Ibérica, que es de 31-32 km (5). Es una estructura iniciada en el Oligoceno superior-Mioceno inferior, que se corresponde con la continuación de las estructuras extensionales de los Pirineos y la Cadena Costera Catalana. En detalle, se trata de estructuras en *graben* estrecho de dirección NE-SO y fosas transversales subordinadas de dirección NNO-SSE. El margen oriental muestra un proceso de inversión tectónica donde las estructuras de *rifting* se convierten en un cinturón de pliegues y cabalgamientos vergentes hacia el NO.

Está rellena por materiales terrígenos continentales neógenos, con arcillas margosas y margas con intercalaciones de gravas que corresponden a los materiales más finos de conos de deyección depositados en el centro de la cuenca, y calizas lacustres grises y crema con calcarenitas con tubos de algas. Aparecen subhorizontales o ligeramente basculados. Los sedimentos cuaternarios corresponden a grandes abanicos aluviales pleistocenos, tales como depósitos de mantos de arroyada y de terraza aluvial, retrabajados localmente en la



Fig. 4. Aspecto de los niveles de la Unidad Intermedia en una explotación de arcillas esmectificas (bentonita) cercana a la traza, los bolos inferiores son nódulos de sílex.
Fig. 5. Paleodolinas rellenas de materiales arcillosos verdes en Seseña.

zona costera. En el Holoceno se produce una transición entre los abanicos aluviales, limos y arcillas con canales de gravas y arenas, y el abanico deltáico del Río Turia, con limos y arcillas anaranjados.

En la zona occidental los materiales más antiguos afloran cerca de Buñol, donde la sucesión fluvio-lacustre llega a alcanzar 700 m de espesor. Están constituidos por lutitas, arenas, conglomerados y margas con intercalaciones lignitosas. Por encima yacen conglomerados, areniscas y lutitas que hacia el centro de la cuenca pasan a margas y calizas travertínicas con alguna intercalación conglomerática (Cheste y Chiva). Por encima yacen calizas lacustres algales. En la zona oriental los materiales marinos están constituidos por areniscas y lutitas calcáreas con intercalaciones de calizas bioclásticas. Destacan niveles con grandes ostreoides. Sobre los materiales marinos yace una sucesión de 40 m de margas y calizas de origen lacustre y aspecto masivo.

Algunas singularidades geológico-geotécnicas del trazado

El paso de los valles del Manzanares, Jarama y Tajo

El trazado tiene su origen en el margen meridional de la Cuenca de Madrid, y atraviesa, según el avance de los pp.kk., diferentes unidades morfoestructurales. Cruza la depresión del Manzanares, constituida por un amplio valle con una serie de depósitos arcóscicos de origen fluvial, salvando varias infraestructuras con una pérgola y viaducto hasta el relieve estructural del Bloque de Espartinas (con túneles artificiales como el de

Dehesa Nueva del Rey, de 1.430 m, en un paraje natural protegido) que constituye la divisoria de aguas del río Jarama, y que termina en el escarpe existente en el lado derecho de su valle. Desciende con un 30% hasta la depresión Tajo-Jarama, que es salvada mediante un viaducto sobre el río Tajo de unos 1.000 m, con 25 vanos y altura de pilas de 24 m, así como otro viaducto para sortear el FF.CC. Aranjuez-Alcazar de San Juan.

Los terrenos atravesados al inicio están geológicamente formados por materiales miocenos y cuaternarios. Dentro de los primeros, el proyecto diferencia: *Yesos y sales masivas con intercalaciones arcillosas*, con montera de alteración importante, en los que se han diferenciado varios litotipos; y, *Unidad Intermedia* donde se han distinguido *Yesos, carbonatos y ocasionalmente arcillas, Alternancia de arcillas verdes y arenas micáceas; Arcillas, margas y margocalizas y niveles de sílex* (figura 4). Los materiales cuaternarios son diversos, destacando las gravas, arenas y limos de las terrazas y el aluvial del Tajo.

Hidrogeológicamente se trata de materiales de baja permeabilidad que presentan zonas de circulación preferente por procesos de disolución y fisuración, así como procesos kársticos de edad variable, resultando paleokarsts fósiles rellenos (figuras 5 y 6) o huecos, algunos reactivados y otros de neoformación. El quimismo del agua varía desde el inicio de la traza al ir aumentando su mineralización. El nivel freático se sitúa a 3-4 m, y en el aluvial está asociado al río, por lo que se encuentra muy cercano a la superficie.

Los materiales ha excavar eran ripables, con utilización ocasional de martillo hidráulico y voladura en niveles yesíferos masivos. La mala calidad de los mismos (ar-



Fig. 6. Huecos kársticos rellenos de arcillas de descalcificación en Aranjuez.

cillas de alta plasticidad y yesos) junto a las limitaciones medioambientales para la apertura de préstamos produjeron una cierta descompensación de tierras.

Ascenso a la Mesa de Ocaña

El trazado salva el condicionante orográfico de tener que ascender desde el valle del río Tajo (490 m) hasta la mesa de Ocaña (730 m), pasando por una llanura intermedia en la que se encuentra Ontígola. Se desarrolla con una rampa inicial del 25‰ (salvo en el viaducto sobre el Arroyo Salinas) en materiales del Mioceno inferior, con un nivel superior de alteración de 7-13 m. Para salvar este desnivel hubo que perforar tres túneles (El Regajal, Los Rincones y el túnel artificial bajo la autovía A-40) y los viaductos del Arroyo Salinas y de Cuesta Perdida.

El Túnel de El Regajal, de unos 2.437 m de longitud total, se proyectó para que la afección a la Reserva Natural de El Regajal-Mar de Ontígola fuese mínima. Se aprovechaba también para pasar bajo un enlace con la A-4 y la N-400. El túnel de Los Rincones (373 m) se proyectó para solventar un desmonte de 30 m al subir a media ladera las estribaciones de la mesa de Ocaña y el túnel artificial bajo la autovía A-40, de 800 m, se excavó en las *Calizas del Páramo* con inclinación del 10‰ para superar el último obstáculo hasta alcanzar la mesa de Ocaña.

Este tramo fue durante las fases de proyecto y obra uno de los más problemáticos. Los riesgos geológicos que existían derivan de la inestabilidad de las laderas que afectan a los niveles superiores margosos y arcillosos del Mioceno y provocan el deslizamiento de las calizas suprayacentes, así como de la elevada solubilidad y expansividad de los materiales presentes, que contie-

nen minerales muy evolutivos e inestables (yeso, anhidrita, halita y sales sódicas). La transformación de la unidad de glauberita subyacente al yeso es un proceso activo en la actualidad, al igual que la karstificación de los yesos y sales presentes. Asimismo, el agua se infiltra a través de las fallas principales y de la red de fracturación, produciendo la formación de salmueras y aguas de gran agresividad química.

El Túnel de El Regajal consta de una parte central excavada en mina (2.080 m) y dos tramos de túnel artificial en sus extremos. El primero, realizado para acercar en lo posible la boquilla de entrada al estribo de salida del Viaducto del Arroyo Salinas y reducir al máximo la afección a la Reserva Natural. La boquilla SE presenta el condicionante de cruzar bajo el enlace de la autovía A-4 con la N-400 en zona de escasa montera. Como punto singular destaca el paso del túnel bajo la autopista R-4 con montera mínima de 18 m. Figuras 7 y 8.

El túnel atraviesa a lo largo de toda su longitud, de abajo a arriba, el conjunto de materiales del Mioceno medio e inferior (*Unidad Salina Inferior*). Las previsiones de afección a cada unidad eran de unos 900 m (37%) en arcillas yesíferas y yesos arcillosos negruzcos con indicios de halita, de 400 m (16%) en halita, glauberita y anhidrita con arcillas grises y negruzcas, la presencia de glauberita con algo de yesos y halita e intercalaciones de arcilla en un máximo de 1.550 m (70%), y de yesos con intercalaciones de arcillas en una longitud de 250 m (10%). El nivel freático se ha detectado bajo la cota de rasante salvo en los niveles de yesos superiores en que aparece como un nivel colgado.

La principal problemática geotécnica proviene de la alta solubilidad de los materiales atravesados, cloruros (halita), sulfatos (yeso, anhidrita y glauberita), de sus transformaciones mineralógicas y de los fenómenos de



Fig.7. Precipitaciones de sales en el emboquille de El Regajal. A la derecha, fig. 8. Rozadora en el interior del Túnel de El Regajal.

expansividad asociados a ellos y a los minerales arcillosos expansivos presentes (esmeclitas). Otros problemas están asociados a posibles fenómenos de fluencia en la halita, con deformaciones a largo plazo, y al ambiente muy agresivo al hormigón y al acero por la presencia de minerales con sulfatos y cloruros. No se consideró adecuado emplear explosivos en la excavación del túnel para no alterar las condiciones ambientales ni el régimen hidrogeológico del macizo al aumentar su fisuración. La excavación se realizó mediante rozadora (figura 8) usando siempre una mínima cantidad de agua. En el proyecto del túnel hubo que diseñar secciones de revestimiento con elementos y materiales muy singulares en base a las especiales características del terreno.

La Mesa de Ocaña constituye un paisaje controlado por la litología y la estructura tabular de la serie neógena, coronada por las Calizas del Páramo, que, a su vez, están recubiertas por sedimentos pliocenos (arcillas rojas, arenas cementadas y conglomerados); pliocuaternarios (arcilla margosa rojiza, costra calcárea edáfica y limos y arcillas limosas pardas) y niveles cuaternarios varios. No presenta problemas geotécnicos significativos. Las excavaciones pueden hacerse con medios mecánicos, sin necesidad de realizar voladuras. Este tramo incluye como elementos significativos: 3 viaductos para salvar diversas infraestructuras y el río Riansares, 1 falso túnel para pasar bajo la A-40 y la N-400 de 290 m y una pérgola de 110 m que permite el paso sobre la Línea Aranjuez-Cuenca.

El paso de la Sierra de Altomira

La Sierra de Altomira presenta un destacado relieve lineal con respecto al modelado circundante, formando una serie de cerros y colinas orientadas de

norte a sur entre las que se intercalan valles amplios. Para el cruce de uno de estos cerros se proyectó el Túnel de Sierra Altomira de unos 768 m, con un recubrimiento máximo de 37 m. La estructura geológica en la zona del túnel forma un anticlinal de eje perpendicular a la traza. El buzamiento de su flanco O es de 16°, mientras que el del flanco E aumenta hasta 45°. Los materiales cretácicos se encuentran en general bastante fracturados. El túnel se excavó en un 80% en materiales carbonatados jurásicos; el resto en niveles del *Keuper* a favor de fallas (unos 20 m) y en materiales cretácicos (unos 110 m). Los sondeos del Estudio Geotécnico previo al proyecto identificaron abundantes oquedades debidas a karstificación y rellenos kársticos, en especial en los materiales cretácicos del final del túnel. El estudio del macizo se completó con sondeos a destroza y perfiles de tomografía eléctrica a lo largo de todo el túnel.

Un elemento significativo a la salida del túnel es una torca (dolina) situada a 700 m al norte de la traza, de unos 180 m de diámetro y 15 m de profundidad, desarrollada en yesos alabastrinos masivos muy karstificados de tránsito a los materiales paleocenos. Estos mismos materiales aparecen una vez pasado el túnel, donde se han identificado huecos y rellenos kársticos de hasta varios metros de espesor, así como zonas endorreicas atravesadas por el trazado en relleno, para cuyo estudio se realizaron campañas de geofísica específicas y de sondeos a destroza.

A lo largo del tramo aparecen de forma discontinua los materiales detríticos del Mioceno superior, fosilizando un paleorelieve, lo que provoca que su espesor sea muy irregular. Suelen rellenar pequeñas cubetas aisladas situadas en el interior de la sierra, o aparecer con morfología de glacis al pie de la Sierra de Altomira.



Fig. 9. Aspecto del *Lapis Specularis* al natural y en laja transparente.

La Depresión Intermedia

Los contrastes litológicos terciarios hacen que la topografía del trazado se caracterice por la profusión de relieves estructurales de envergadura muy variable que obligó a buscar un equilibrio entre desmontes y terraplenes con la generación de varios túneles y viaductos. El cuaternario lo forman depósitos de mantos de alteración, de derrubios de ladera y de dinámica fluvial. El trazado recorre el margen de la llanura del río Cigüela, que presenta nivel freático alto y posible riesgo de inundación.

En el sector central de la cuenca, la serie miocena se ha dividido en tres tramos: inferior o de yesos grises de aspecto masivo, intermedio, formado por arcillas y areniscas rojizas pertenecientes a contexto de abanico aluvial, dispuestas sobre el anterior en acusada discontinuidad, y superior, compuesto por calizas tableadas grises, con gran desarrollo de formas kársticas y dolinas de más de 100 m de diámetro, con intercalaciones margosas. La serie oligocena presenta una alternancia de arcillas, lutitas rojas y margas con estratos de areniscas y conglomerados.

Las obras de uno de los túneles ha dejado al descubierto una mina romana de *Lapis Specularis* (Vallejo de Castillejo, en Torrejuncillo del Rey) que aportó información sobre el patrimonio minero romano. El *Lapis Specularis* es un yeso selenítico (figura 9) que tiene la propiedad de dejarse cortar con facilidad y se exfolia en finas capas. Se usó en el Imperio Romano como sistema de acristalamiento para ventanas en numerosas edificaciones, ya que el ensamblaje de placas de espejuelo permitía cubrir espacios amplios. Era el principal recurso económico de la zona en época romana. Se exportaba el material directamente a Roma.

Entre las unidades de obra proyectadas más significativas de esta unidad destacan:

- Viaducto del río Cigüela. En su margen derecha se había previsto un terraplén de unos 700 m. Su cimiento presentaba problemas de asentamientos por consolidación, diferidos en el tiempo, debido a la existencia en profundidad de niveles muy compresibles. El tratamiento del terreno no garantizaba que se eliminaran los asentamientos residuales por lo que finalmente se optó por prolongar el viaducto y elevar la rasante, resultando un viaducto de 1.569 m, con vanos de 35 a 65 m y pilas con cimentación profunda mediante pilotes a excepción del estribo 2.
- Túnel de Horcajada (3.957 m). Proyectado para ascender a la mesa de El Llano con una pendiente inicial del 15,06‰, atravesando los niveles yesíferos inferiores y los detríticos, hasta alcanzar los niveles calizos. Dada la naturaleza de los materiales, se recomendó como método de excavación el empleo de rozadoras o retroexcavadora con el apoyo de martillo neumático.
- Viaducto de Las Higuieruelas: compuesto por 35 vanos de 30,5 m y unos 1.556,5 m de longitud.
- Túnel de Cabrejas (2.020 m). Tiene un tramo intermedio en mina de unos 1.620 m, y atraviesa niveles areniscos miocenos subhorizontales con marcada morfología lentejonar de canal. Su excavación se basa en el Nuevo Método Austriaco, con paraguas medio a pesado en el paso de zonas reblandecidas o con rellenos kársticos para garantizar la estabilidad de la clave.
- Túnel Loma del Carrascal (2.198 m). Presenta una montera máxima de 68 m y su excavación preveía, en un 80%, materiales formados por una superposición de bancos de argilitas con yesos y capas de

areniscas métricas a decimétricas con niveles esporádicos de calizas, conglomerados y yesos masivos alabastrinos karstificados. El túnel atraviesa un acuífero multicapa.

- Viaducto Arroyo de la Vega. Su longitud está condicionada por problemas geotécnicos, derivados de la existencia de suelos saturados blandos en profundidad, sobre argillitas yesíferas que presentan karstificación, con cuevas de dimensiones métricas rellenas de arcillas blandas, alternando con yesos alabastrinos. Para evitar los terraplenes de acceso sobre estos materiales, se planteó como mejor solución la implantación de un viaducto de 490 m, frente a los 190 m iniciales, para salvar la zona de suelos blandos, con pilotes empotrados en los niveles de yesos alabastrinos sanos, resultando 13 vanos interiores de 33,5 m y 2 extremos de 27 m.
- Viaducto del Río Júcar (562 m). Para cumplir la D.I.A. se diseñó un vano de 90 m sobre el cauce del río, adoptando pilas centrales en forma de V para no afectar a la vegetación de ribera.

Rama Castellana de la Cordillera Ibérica

Formada por dolomías masivas cretácicas (Ciudad Encantada), calizas margosas, margas de aspecto tablado y brechas dolomíticas, con depósitos detríticos terciarios adosados a los relieves mesozoicos. Es atravesada al inicio del trazado por el Túnel del Bosque (3.128 m), con unos 2.912 m excavados en mina por métodos convencionales y una pendiente del 15,48%. Se excava en un 60% en las brechas dolomíticas de Cuenca, realizándose el arranque con medios mecánicos y voladura. El macizo rocoso presenta karstificación con huecos métricos y rellenos arcillosos.

Pasada la estación de Cuenca, el trazado gira hasta situarse subparalelo a las estructuras geológicas NO-SE, llegando a ser NNE-SSO en algunos puntos y a disponerse O-E en el borde suroccidental del Dominio Ibérico, y SO-NE en el embalse de Contreras.

También se encuentran karstificados los materiales del tránsito cretácico superior-paleoceno (yesos), en los que se han previsto tratamientos mediante inyecciones de lechada, con obturadores y a presiones máximas de 200 kpa. En las inmediaciones de la traza se identifican varias dolinas en la unidad yesífera, que forman parte de un sistema kárstico en sentido estricto. Hay que diferenciarlas de las dolinas generadas en la facies *garumniense* por disolución o pérdida del cemento calcáreo.



Fig. 10. Detalle del yacimiento paleontológico de Lo Hueco.

En la trinchera correspondiente al túnel artificial de Lo Hueco, de unos 157 m, ha aparecido un importante yacimiento de restos óseos fosilizados de 8 géneros de dinosaurios, cocodrilos, tortugas y serpientes del Cretácico superior, convirtiéndose en el más importante de Europa (figura 10). Tras su recuperación y estudio paleontológico se prosiguió con las obras proyectadas.

Entre las unidades de obra proyectadas más significativas destacan:

- Túnel de Los Cubillos (1.585 m). Presenta como punto singular el cruce de un barranco, encajado en una falla, con una cobertera de solo 6 m ocupada en gran parte por depósitos cuaternarios de naturaleza arcillo-limosa. La excavación del relleno se proyectó hasta los riñones del túnel, creando una bóveda de hormigón sobre una cimbra de forma que quedara un espacio libre para el caso de tener que efectuar voladuras.
- Viaducto Barranco del Rodenillo. Con 15 vanos, longitud de unos 657 m y cimentación profunda.
- Viaducto Arroyo de las Huertas de Mateo, de 995 m, con 22 pilas, una altura máxima de 21 m y cimentación por pilotes.
- Túnel de Minglanilla (519,5 m). Con una montera máxima de 40 m, tiene la particularidad de atravesar un diapiro triásico, por lo que el túnel presenta dos zonas bien diferenciadas. Inicialmente por el Oeste discurre en materiales triásicos, con frecuentes cambios litológicos y fallas subverticales y ocasionalmente con yesos masivos y arcillas esmectíficas. Tras un contacto mecánico aparecen los conglomerados miocenos de geometría subhorizontal en la zona Este. El túnel se excavó con medios mecánicos, prestando especial atención al contacto mecánico por la posible fluencia de agua.



Fig. 11. Puente arco del Embalse de Contreras, en construcción.

- Túnel de la Hoya Roda (1.997 m). Presenta tres zonas de falso túnel al tener una zona intermedia de 193 m con muy poca cobertura. Se ha excavado en materiales terciarios con una pendiente del 30%. La excavación se ha proyectado por métodos convencionales, con empleo casi exclusivo de medios mecánicos, y la construcción sistemática de contrabóveda debido a la presencia de cierta expansividad en las arcillas miocenas.
- Viaducto del Embalse de Contreras. Para atravesar el embalse se ha proyectado una solución de puente arco con longitud entre estribos de 587 m. Ha resultado ser el puente arco de hormigón para ferrocarril de mayor luz de Europa (figura 11), consiguiendo el XI Premio Internacional Puente de Alcántara.
- Viaducto del Istmo. Con 830 m, pilas de entre 20 y 75 m de altura y vanos de 55+80+7x90+65.

Cuenca del Cabriel y Entronque Cordillera Ibérica-Cordillera Bética

En esta unidad destaca el Túnel de Villargordo del Cabriel (3.340 m), con 2.880 m en mina, para ascender a la cuenca terciaria. El emboquille en falso túnel se debe a la protección ambiental de las inmediaciones de la Rambla Salada, zona incluida como monte de Utili-

dad Pública. Atraviesa inicialmente en sus dos 2/3 materiales del Keuper y el resto son materiales terciarios, que presentan una erosión en paleorelieve fósil. Los materiales del Keuper presentan oquedades kársticas rellenas de arcillas o limos yesíferos flojos. Se proyectó su excavación por métodos mecánicos con contrabóveda.

La Cuenca Terciaria del Cabriel tiene topografía muy plana, relieves alomados suaves y amplias vaguadas. Sin problemas geotécnicos importantes. Destaca el Viaducto del río Magro de 1.158 m.

El paso del dominio Ibérico al Bético se realiza salvando un desnivel de 325 m mediante cuatro túneles: el túnel de La Raboseda (1.462 m), que se inicia con una pendiente del 25%, y los túneles de Siete Aguas (424 m), La Cabrera (7.250 m) y Buñol (1.615 m), que atraviesan dolomías cretácicas y calizas jurásicas muy karstificadas, hasta la Hoya de Buñol.

La longitud del túnel de La Cabrera obligó a una solución bitubo, excavada en un 85% en calizas jurásicas, en las que se identificaron huecos de hasta 4 m. La cobertura máxima es de 190 m y la mínima de 19 m. Se usó un topo abierto para reducir el riesgo de excavar en terrenos kársticos.

El Túnel de Chiva (670 m) atraviesa el sustrato terciario de la cuenca de Buñol en facies intermedias. Su excavación se proyectó por el método alemán en materiales tipo suelo con montera de 81 m.

Cubeta Valenciana

Es una amplia depresión de origen tectónico que se corresponde con una llanura prelitoral donde se encajan los cursos fluviales formando ramblas. Los materiales provienen de los abanicos aluviales de la cordillera ibérica que descienden hasta La Albufera.

No presenta ninguna problemática geológico-geotécnica singular, el riesgo geológico más significativo son las avenidas. Destaca el Túnel artificial de Torrent, realizado en zona urbana con 2.990 m. ♦

Referencias:

- (1) ADIF. *Memorias de los Estudios Geotécnicos del Nuevo Acceso Ferroviario de Alta Velocidad de Levante. Madrid-Castilla la Mancha-Comunidad Valenciana-Región de Murcia.*
- (2) ADIF. *Memorias de los 36 Proyectos de*

Construcción de Plataforma del Nuevo Acceso Ferroviario de Alta Velocidad de Levante. Madrid-Castilla la Mancha-Comunidad Valenciana-Región de Murcia.

- (3) VERA, J.A. (ed.). *Geología de España.* Madrid: Sociedad Geológica de España e Instituto Geológico y Minero de España, 2004. 890 p. ISBN: 84-7840-546-1.

-(4) MUÑOZ MARTÍN, A.; DE VICENTE, G. "Origen y relación entre las formaciones y esfuerzos alpinos de la zona centro-oriental de la Península Ibérica". *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 1998, vol. 11, p. 57-70.

-(5) GIBBONS, W.; MORENO M. T. (ed.). *The Geology of Spain.* London: Geological Society, 2002. 649 p. ISBN: 1-86239-110-6.