PUBLICACIONES DEL INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA
GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA Nº 5

Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro



Sociedad Española de Geomorfología

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Editores: Juan José Durán Valsero, Manuel Montes Santiago, Alejandro Robador Moreno y Ángel Salazar Rincón

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD

Instituto Geológico y Minero de España

Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro

Actas de la XIV Reunión Nacional
de Geomorfología
Málaga, 22-25 de Junio de 2016

Editores
Juan José Durán Valsero, Manuel Montes Santiago,
Alejandro Robador Moreno y Ángel Salazar Rincón

Madrid, 2016

Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro / Juan José Durán Valsero, Manuel Montes Santiago, Alejandro Robador Moreno y Ángel Salazar Rincón, eds.- Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2016

768 pgs; ils; 24 cm.- (Geología y Geofísica; 5)
ISBN 978-84-9138-013-9
Geomorfología, España

Portada: Panorámica de El Torcal Alto (Antequera, Málaga).

Foto: J. J. Durán

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier otro sistema de almacenar información sin el previo permiso escrito del autor o editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).

© INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA
Ríos Rosas, 23. 28003 MADRID
NIPO: 72816018X
ISBN: 978-84-9138-013-9
Depósito Legal: M-21672-2016
Catálogo y venta de publicaciones de la Administración General del Estado en:
http://publicacionesoficiales.boe.es/

Imprime: Lerko Print S.A.
Paseo de la Castellana, 121
28046 Madrid

Impreso en papel ecológico

Comité organizador

Juan José Durán Valsero (IGME), Bartolomé Andreo Navarro (UMA),
Francisco Carrasco Cantos (UMA), Andrés Díez Herrero (IGME),
Ángel Martín-Serrano García (IGME), Manuel Montes Santiago (IGME),
Matías Mudarra Martínez (UMA), María Jesús Perles Roselló (UMA),
Alejandro Robador Moreno (IGME), Pedro Robledo Ardila (IGME),
Ángel Salazar Rincón (IGME), Iñaki Vadillo Pérez (UMA)

Comité científico

Juan José Durán Valsero (IGME), Arantxa Aranburu Artano (UPV/EHU),
José Miguel Azañón Hernández (UGR), Javier Benavente González (UCA),
Gerardo Benito (MNCN - CSIC), Mercedes Cantano Martín (UHU),
David Casas Layola (IGME), Jordi Corominas Dulcet (UPC), Antonio Gómez Ortiz (UB),
Andrés Díez Herrero (IGME), Montserrat Jiménez Sánchez (UNIOVI),
Francesc Gallart (IDAEA-CSIC), Celso García García (UIB),
Guillermina Garzón Heydt (UCM), Elena González Cárdenas (UCM),
Alberto González Díez (UNICAN), Juan Antonio González Martín (UAM),
Francisco Javier Gracia Prieto (UCA), Francisco Gutiérrez Santolalla (UNIZAR),
Jerónimo López Martínez (UAM), Adolfo Maestro González (IGME),
Ángel Martín-Serrano García (IGME), Manuel Jesús Montes Santiago (IGME),
Jorge Olcina Cantos (UA), Augusto Pérez Alberti (USC), María Jesús Perles Roselló (UMA),
David Regües (IPE-CSIC), Alejandro Robador Moreno (IGME),
Pedro Agustín Robledo Ardila (IGME), Ángel Salazar Rincón (IGME),
Susanne Schnabel (UNEX), Francisca Segura Beltrán (UV), Enrique Serrano Cañadas (UVA),
Albert Solé Benet (EEZÁ-CSIC), Xavier Úbeda Cartañà (UB), Juan Tomás Vázquez (IEO),
Damiá Vericat (UDL), Joaquín Rodríguez Vidal (UHU), Joan Manuel Vilaplana (UB)

ORGANIZADORES

Instituto Geológico y Minero de España

Universidad de Málaga

PATROCINIO INSTITUCIONAL

Sociedad Española de Geomorfología (SEG)

Índice

Pág.

Cartografía geomorfológica

Innovación en la producción de cartografía geomorfológica de amplias y variadas superficies. Ecuador, un caso de éxito. *I. Barinagarrementeria y A. Leránoz* 19

Detección de superficies de aplanamiento mediante Modelos Digitales de Elevación: un ejemplo de análisis del relieve en los Montes Galaico-Leoneses (Noroeste de España). *A. Mínguez, A. Martín-Serrano y E. García-Meléndez* 27

Geomorfología en el primer Mapa Geológico realizado en España. Á. Martín-Serrano García y E. Boixereu y Vila 37

La meteorización de los granitoides de Les Guilleries y su tratamiento en el Mapa geológico de los procesos activos y recientes y de la actividad antrópica de Cataluña a escala 1:25 000 (Mapa Geoantrópico). *M. J. Micheo, L. Culí, R. Carles, E.Pi, J.Picart, J. Cirés y I. Herms* 45

La cartografía regional de peligrosidad de inundación por criterios geomorfológicos en el Plan de Acción Territorial frente al Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA). *C. SanchisIbor, J.M. Ruiz Pérez, J.S. Palencia Jiménez y F. Francés* 51

El delta del Ebro a través de la cartografía histórica y la fotografía aérea: evolución morfológica de la llanura deltaica (1858-2012). *A. Valls, F. Segura y B. Martínez-Clavel* 61

Geomorfología y medio ambiente

Monitorización de procesos geomorfológicos activos aplicada a la geoconservación y gestión del uso público en el parque nacional de Cabañeros (Ciudad Real-Toledo). *A. Díez-Herrero, J. Vegas, L. Carcavilla, M. Gómez-Heras y A. García Cortés* 73

Efecto de una lluvia torrencial post-incendio en la repelencia al agua y la velocidad de infiltración de un suelo en un ambiente mediterráneo (NE España). *Marcos Francos, Paulo Pereira, Meritxell Alcañiz, Jorge Mataix-Solera; Victoria Arcenegui y Xavier Úbeda* 81

Utilidad de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) de bajo coste y la fotogrametría automatizada (SfM) para elaborar modelos tridimensionales de alta resolución de formas complejas. Á. Gómez-Gutiérrez, F. Berenguer-Sempere, J. Lozano-Parra, S. Schnabel y F. Lavado-Contador 89

Pág.

Evaluación de técnicas de recuperación de zonas acarcavadas en Extremadura mediante modelos 3D de alta resolución: resultados preliminares. Á. Gómez-Gutiérrez, S. Schnabel, F. Lavado-Contador, J.J. de Sanjosé-Blasco, A.D.J. Atkinson y M. Pulido-Fernández 97

Reconstrucción de paleolíneas de costa en la Laguna de Gallocanta (Cordillera Ibérica) mediante fotos aéreas y datos LiDAR de alta resolución. *F.J. Gracia, C. Castañeda* .. 105

Una aproximación SIG de la afección producida por los cambios de uso del suelo en un sistema hidrológico de una cuenca mediterránea de montaña. *I. Lizaga, L. Quijano, L. Palazón, L. Gaspar, A. Navas* 113

Influencia de la densidad de plantación sobre el control de la erosión en laderas de canteras calcáreas en restauración del SE peninsular. *L. Luna, E. Rodriguez-Caballero, A. Afana, A. Solé-Benet* 121

Inventario preliminar de los lugares de interés geomorfológico de la Gran Senda de Málaga. *J.F. Martínez Murillo, J.D. Ruiz Sinoga, E. Ferre Bueno* 127

El impacto ambiental en la geomorfología de zonas de montaña: el registro sedimentario del Lago de La Cueva (Parque Natural de Somiedo, Asturias). *M. Morellón, J. Vegas, M.P. Mata, A. Vicente de Vera, J.A. Rodríguez García, J. Sánchez España y F. Barreiro-Lostres* 135

Dinámicas hidro-geomorfológicas en espacios de interfaz natural-artificial. Peligrosidad de generación de balsas en infraestructuras viarias. *S. Pardo-García, S. Reyes-Corredera y M. J. Perles-Roselló* 143

El lago de Enol (Asturias): origen, evolución y dinámica geomorfológica. *J. Rodríguez García, J. Vegas, M. López-Vicente, M.P. Mata, M. Morellón, A. Navas, Á. Salazar, J. Sánchez-España* 151

Corrección del crecimiento basal de Quercus ilex para estimar tasas de erosión a partir de raíces semi-expuestas. *J. Rubio-Delgado, S. Schnabel y Á. Gómez-Gutiérrez* 159

La cartografía regional de peligrosidad de inundación por criterios geomorfológicos en el Plan de Acción Territorial frente al Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA). *C. SanchisIbor, J.M. Ruiz Pérez, J.S. Palencia Jiménez y F. Francés* 167

Geomorfología y geoarqueología

Caracterización geomorfológica y edafo-sedimentaria de un yacimiento arqueológico en la Sierra de O Barbanza (A Coruña). *M. Costa-Casais, R. Blanco-Chao, G. Gómez-Rey, R. Fábregas Valcarce, C. Rodríguez-Rellán, V. Barbeito Pose* 179

Actuaciones para la conservación y estudio de los depósitos de paleoinundaciones en el yacimiento arqueológico musteriense del Abrigo del Molino (Segovia). *A. Díez-Herrero, A. Sopeña, Y. Sánchez-Moya, G. Benito, D. Álvarez-Alonso, M. De Andrés-Herrero, J. Rojo, M. Hernández y S. Sánchez-Torralbo* 187

Pág.

Aproximación a las tasas de colmatación, por meteorización físico-química, de la cavidad del yacimiento arqueológico musteriense del Abrigo del Molino (término municipal de Segovia, Segovia). *A. Díez-Herrero, D. Álvarez-Alonso, M. De Andrés-Herrero y J. Rojo* 195

Geomorfología y procesos de ladera

Desarrollo de escenarios de peligrosidad y riesgo por deslizamientos (proyecto Espérides). *J. Bonachea, J. Remondo, V. Rivas, J. Sánchez-Espeso, V.M. Bruschi, A. Cendrero, J.R. Díaz de Terán, G. Fernández-Maroto, J. Gómez-Arozamena, A. González-Díez, C. Sainz* 205

Modelo de susceptibilidad de deslizamientos superficiales para la cuenca del río Oria (Gipuzkoa). Aplicación de la regresión logística y comparación de resultados con estudios precedentes. *T. Bornaetxea , O. Ormaetxea y I. Antigüedad* 213

La avalancha de rocas de la Coma d'Espòs, Pirineo Central, Lleida: un evento prehistórico catastrófico. *J. Corominas y J. R. Ruiz-Carulla* 221

Tres años después de la reactivación del argayo de Sebrango (Cantabria). *A. González-Díez, G. Fernández Maroto, P. Martínez Cedrún, M. Zarroca, R. Linares, E. San Millán, J. Bonachea, V.M. Bruschi, J. Sánchez Espeso, J. Remondo J. R. Díaz de Terán* 229

Elaboración de inventarios nacionales de movimientos de ladera en España y Chipre para la evaluación de su susceptibilidad a escalas nacional y europea. *J. Hervás* 237

El movimiento en masa de Brez (Picos de Europa, Cordillera Cantábrica). *A. Rodríguez García, F. Nozal, y A. Suárez Rodríguez* 243

El deslizamiento activo de "el Bec Vermell" en la costa Norte de Menorca (Baleares). *F.X. Roig-Munar, J.M. Vilaplana, J.M., A. Rodríguez-Perea, J. A. Martín-Prieto y B. Gelabert* 251

Detección e inventario de desprendimientos de rocas mediante el seguimiento con LiDAR Terrestre en la Montaña de Montserrat (Catalunya, España). *M.J. Royán, J.M. Vilaplana, M. Janeras y A. Abellán* 257

Influencia de las precipitaciones en la ocurrencia de movimientos de ladera en Cantabria. *E. San Millán, A. González-Díez y G. Fernández-Maroto* 265

Susceptibilidad de movimientos en masa en infraestructuras viarias. Aplicación a un tramo de la autovía A-7 (circunvalación de Málaga). *J.F. Sortino Barrionuevo, M.F. Mérida Rodríguez y M.J. Perles Roselló* 273

Geomorfología fluvial

Análisis de la vulnerabilidad social ante avenidas súbitas en zonas urbanas de Castilla y León (España). *E. Aroca-Jiménez, J.M. Bodoque, J.A. García, A. Díez-Herrero* 283

Registro de paleoinundaciones en el desfiladero de los Gaitanes y su implicación en la evaluación de la seguridad de las presas del alto Guadalhorce (Málaga). *G. Benito,*

Pág.

M.T. Rico, Y. Sánchez-Moya, A. Sopeña, V. Thorndycraft, A. Díez-Herrero y M.A. Perucha 291

Cuantificación de incertidumbres en la reconstrucción hidráulica bidimensional de paleoinundaciones a velocidades subcríticas en valles confinados (río Guadalquivir). *P. Bohórquez y F. García-García* 299

Dinámica geomorfológica de un cauce efímero afectado por extracción de gravas. *M. Calle, P. Alho y G. Benito* 307

Las avenidas torrenciales de los barrancos de Portainé, Reguerals y Ramiosa (Pirineo Central): evolución de las cuencas y dinámica torrencial. *G. Furdada, M. Génova, M. Guinau, A. Victoriano, G. Khazaradze, A. Díez-Herrero, J. Calvet* 315

Las terrazas del río Alagón. Dataciones por luminiscencia y significado en el contexto de la Depresión de Coria (Cáceres). *G. Garzón, R. Tejero, P. Fernández, J. Garrote* 323

Estimación inicial de la producción hidrosedimentaria en la cuenca hidrográfica del Guadalete (Cádiz, España). *M. Hamani, F.J. Gracia, J. Benavente y J.J. Gomiz* 331

Cambios geomorfológicos en el Alto Cinca, periodo 1927 – 2014. *M. Llena, D. Vericat y J.A. Martínez-Casasnovas* 339

Hidroclimatología de las inundaciones históricas y paleocrecidas del río Duero en su tramo medio e internacional. M.J. Machado, A. Medialdea, M. Barriendos y G. Benito 349

El uso de la potencia hidráulica del río como indicador de procesos geomorfológicos. *V. Martínez-Fernández, M. González del Tánago y D. García de Jalón* 357

Erosión minera en la cuenca del arroyo Peñalén (Parque Natural del Alto Tajo, Guadalajara). *C. Martín-Moreno, J.F. Martín Duque, J.M. Nicolau, A. Muñoz, I. Zapico* 365

Estimación de los tiempos de concentración: implicaciones de la simplificación morfométrica en el análisis hidrológico de caudales de avenida fluvial. *L. Martins, A. Díez-Herrero, J.M. Bodoque, C. Bateira* 375

Versatilidad de la datación por luminiscencia en el estudio de suelos y depósitos de crecida. *A. Medialdea, G. Benito y K.J. Thomsen* 383

Datación preliminar por ESR de la secuencia de terrazas fluviales del valle del Arlanza (Sector NE de la Cuenca del Duero, Burgos). *D. Moreno, A. Benito-Calvo, C. Falguères, P. Voinchet, A. Pérez-González* 391

Cambios morfológicos en el cauce del río Serpis tras la construcción del embalse de Beniarrés (Alicante, 1958-2013). *A. Navarro, C. Sanchis-Ibor y F. Segura-Beltrán* ... 399

Cambios recientes en el patrón de inundaciones en la rambla de Nogalte (Murcia). *J. A. Ortega-Becerril, G. Garzón, M. Béjar-Pizarro y J.J. Martínez-Díaz* 407

Dataciones cosmogénicas en el cañón del Bajo Guadiana: evolución de la terraza rocosa e incisión del canal interno. *J.A. Ortega, G. Garzón, R. Tejero, A.S. Meriaux* 415

Geocronología de la actividad hidromagmática del maar de Cuelgaperros (Campo de Calatrava, Ciudad Real): nuevas aportaciones. *M. A. Poblete, S. Beato, J.L. Marino y J. Ruiz* 423

Pág.

Procesos de transporte en pequeñas cuencas costeras de las Illes Balears: observaciones sobre sus condicionantes litológicos y estructurales. *F. Pomar, L. Del Valle, J.J. Fornós y L. Gómez-Pujol* 431

Ajustes del cauce y dinámica de barras en la Rambla de Ramonete (Murcia) entre 1956 y 2013: cambios de usos del suelo y acción antrópica. *E. Sánchez, F. Segura-Beltrán, C. Sanchis-Ibor* 439

Aplicación de datos LiDAR en el estudio de la dinámica torrencial y evolución de los barrancos de Portainé y Reguerals (Pirineos Centrales). *A. Victoriano, M. Guinau, G. Furdada, J. Calvet1, M. Cabré y M. Moysset* 447

Geomorfología litoral y submarina

Análisis de las morfologías de pequeña escala en los deltas sumergidos del sureste de la Península Ibérica. *P. Bárcenas, L.M. Fernández-Salas, F.J. Lobo, J.T. Vázquez, N. López-González y J. Macías* 459

Morfodinámica y geoarqueología de un islote arenoso (Ría de Arousa, Galicia). *R. Blanco Chao, M. Costa Casais, D. Cajade Pascual* 467

Implicaciones geomorfológicas del registro sedimentario de la costa occidental de Eivissa (Mediterráneo occidental). *L. del Valle, F. Pomar, J. J. Fornós, L. Gómez-Pujol, V. Anechitei-Deacu, A. Timar-Gabor* 475

El papel de los flujos de turbidez en la morfología y formación de las ondulaciones del fondo del mar en los prodeltas del Mediterráneo occidental: comparación entre las simulaciones numéricas y los datos reales. *Fernández-Salas, L.M., P. Bárcenas, J. Macías, Vázquez, J.T. y López-González, N.* 483

Caracterización energética en base a cálculos de *fetch* aplicada a la gestión de playas. *L. González Ramírez y R. Blanco-Chao* 491

La erosión costera de la Manga del Mar Menor (Región de Murcia) a partir de la segunda mitad del siglo XX. *A.D. Ibarra Marinas, F. Belmonte Serrato, G. Ballesteros Pelegrín* 499

Formación de tómbolos y hemitómbolos a partir de diques rompeolas en playas del sureste ibérico. *A.D. Ibarra Marinas, F. Belmonte Serrato, G. Ballesteros Pelegrín* 507

Rasgos morfológicos del talud continental y llanuras abisales del sector noroccidental de Iberia. *E. Llave, G. Jané, A. Maestro, J. López-Martínez, F.J. Hernández-Molina* 515

Evaluación de los lugares de interés geomorfológico de la costa gaditana. *M. Mancinelli, J. Benavente y F.J. Gracia* 523

Análisis de los cambios morfológicos en el delta sumergido del Ebro (1880-1992). *B. Martínez-Clavel, F. Segura, J.E. Pardo-Pascual, J. Guillén* 531

Caracterización preliminar y evolución reciente de las playas de la Bahía de Algeciras (Cádiz). *J. Montes, J. Benavente y L. Del Río* 539

Estudio de la dinámica geomorfológica mediante la obtención de modelos topográficos históricos y actuales a partir de fotogrametría digital automatizada: acantilados de A

Pág.

Capelada (A Coruña, Galicia). *E. Muñoz-Narciso, J. Horacio, J.M. Sierra-Pernas, A. Pérez-Alberti* 547

Caracterización geomorfológica y hábitats en estructuras volcánicas en el Campo Profundo de Expulsión de Fluidos (NE del Golfo de Cádiz). *D. Palomino, J.T. Vázquez, N. López-González, L.M. Fernández-Salas, J.L. Rueda, E. González-García, V. Díaz-del-Río* 555

Predicción de la evolución a medio plazo de playas expuestas: la playa de Vistahermosa (Bahía de Cádiz). *M. Puig, J. Benavente y L. Del Río* 563

Presencia de bloques de tsunamis en acantilados de Punta Prima (Formrntera). *F. X. Roig-Munar, J. A. Martín-Prieto, J.M. Vilaplana, A. Rodríguez-Perea, B. Gelabert* 571

Geomorfometría de montículos submarinos en el talud continental inferior al oeste de las Islas Canarias: Evolución de las emisiones de fluidos. *O. Sánchez-Guillamón, L.M. Fernández-Salas, J.T. Vázquez, D. Palomino, T. Medialdea y L. Somoza* 579

Geomorfología submarina en relación con la actividad tectónica cuaternaria en la cuenca del Mar de Alborán, sector nororiental. *J.T. Vázquez, F. Estrada, R. Vegas, G. Ercilla, B. Alonso, L.M. Fernández-Salas, P. Bárcenas, D. Palomino, E. d'Acremont, M.C. Fernández-Puga, M. Gómez-Ballesteros, Ch. Gorini* 587

Geomorfología kárstica

Medición de deformaciones en dolinas activas mediante escáneres láser 3D. Un ejemplo en el karst evaporítico del Valle del Ebro, NE de España. *A. Benito-Calvo, F. Gutiérrez, D. Carbonel, G. Desir, J. Guerrero, O. Magri, T. Karampaglidis, I. Fabregat* 599

Monitorización de dolinas activas en el entorno de Zaragoza mediante nivelación geométrica de alta precisión. *G. Desir, J. Guerrero, F. Gutiérrez, D. Carbonel, J. Merino, A. Benito, I. Fabregat, C. Roqué, M. Zarroca, R. Linares* 607

Dolinas relacionadas con la disolución de evaporitas en el Valle del Fluvià, Pirineos orientales, Gerona. *I. Fabregat, F. Gutiérrez, C. Roqué, D. Carbonel, J. Guerrero, F. García-Hermoso, M. Zarroca, R. Linares* 615

Ascenso y colapso simultáneo del diapiro de Salinas de Oro (España). *J. Guerrero* 623

Fases de captura fluviokárstica e incisión del sistema Gaduares - Hundidero - Gato (Serranía de Ronda, provincias de Cádiz y Málaga). *I. Lechuga Manzano, F.J. Gracia Prieto, A. Suma y P.D. De Cosmo* 631

Desarrollo de dolinas de colapso durante épocas de sequía. El caso del karst evaporítico aluvial del valle medio del Río Fluvià. *R. Linares, M. Zarroca, C. Roqué, F. Gutiérrez, I. Fabregat, D. Carbonel, J. Guerrero* 639

Identificación de formas de relieve negativo a partir de datos de vuelo LiDAR. Aplicación al karst evaporítico de Gobantes (provincia de Málaga). *M. Mudarra Martínez, J.M. Gil Márquez, M. Argamasilla Ruiz, B. Andreo Navarro, F. Carrasco Cantos* 647

Pág.

Estimación del criterio geomorfológico para la evaluación de la geodiversidad en un terreno kárstico: la Sierra de las Nieves (provincia de Málaga). *E. Pardo-Igúzquiza, J.J. Durán1, J.A. Luque-Espinar, P.A. Robledo-Ardila* 655

Una comparación de dos métodos estocásticos para la simulación de redes tridimensionales de conductos kársticos. *E. Pardo-Igúzquiza, J.J. Durán, P.A. Robledo-Ardila y J.A. Luque-Espinar* 663

Análisis morfométrico y distribución espacial de las dolinas en Sierra Gorda, Granada, España. *P.A. Robledo, J.J. Durán, R. Cañellas González, E. Pardo, A. González-Ramón, J.S. Luque, S. Martos, C. Guardiola-Albert, , A. Pedrera y M. López Chicano* 671

La organización altitudinal de las formas kársticas en el Macizo Occidental de los Picos Europa. *J. Ruiz-Fernández, M. Oliva, A. Fernández, D. Gallinar y C. García-Hernández* 677

El semipolje de La Estiva (Valle de Pineta, Pirineo oscense): origen, morfoestructura y procesos recientes en una depresión kárstica compleja. *A. Salazar, M.P. Mata, B. Valero Garcés, M. Rico, A. Moreno, F.M. Rubio, P. Ibarra* 687

Aplicación de la tomografía eléctrica de resistividades (ERT) a la investigación de dolinas en el karst evaporítico del Valle del Fluvià (NE de España). *M. Zarroca, R. Linares, C. Roqué, I. Fabregat, F. Gutiérrez, D. Carbonel y J. Guerrero* 695

Geomorfología glaciar

Significado geomorfológico de los depósitos fluviales de la cueva del Granito (Valle de Bujaruelo, Pirineo Central, Huesca). *Miguel Bartolomé, Carlos Sancho, Mikel Calle, Alicia Medialdea, María Leunda, Ana Moreno, Gerardo Benito, Daniel Asenjo* 705

Evolución del volumen de hielo en la cueva de Casteret en los últimos 50 años (Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, Huesca). *M. Bartolomé, C. Sancho, M. Leunda, A. Moreno, Á. Belmonte, B. Oliva-Urcia, J.I. López-Moreno, D. St. Pierre, D. Asenjo, A. Gomollón* 713

Retroceso glaciar en el entorno de Bahía Esperanza (Península Antártica), durante el Holoceno. *M. Nozal, M. Montes y A. Martín-Serrano* 721

El retroceso glaciar en las islas Shetland del Sur (Antártida) durante el Holoceno. *M. Oliva, D. Antoniades, S. Giralt, I. Granados, S. Pla-Rabes, M. Toro y E.J. Liu* 729

Suelo helado estacional y permafrost en las altas cumbres de Sierra Nevada. Síntesis de resultados. *M. Oliva, A. Gómez-Ortiz, A., F. Salvador-Franch, M. Salvà-Catarineu, D. Palacios, L.M. Tanarro, M. Ramos* 739

Dinámica de la capa activa en tres cuencas lacustres de relieve diferenciado (Península Byers, Antártida). *M. Oliva, F. Hrbacek, J. Ruiz-Fernández, M.Á. de Pablo, G. Vieira, M. Ramos, D. Antoniades* 745

Los aludes de nieve en el Alto Aller: su incidencia en la carretera AS-253 del Puerto de San Isidro (Macizo Central Asturiano). *M. A. Poblete, S. Beato y J. L. Marino* 751

Presentación

El presente libro, titulado "Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro", constituye la expresión gráfica de los trabajos presentados en la XIV Reunión Nacional de Geomorfología, celebrada en la ciudad de Málaga entre los días 22 y 25 de junio de 2016.

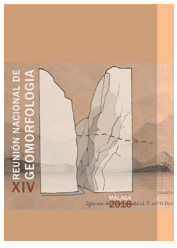
En el curso de la reunión se han presentado 89 trabajos científicos, repartidos en ocho sesiones (Cartografía geomorfológica, Geomorfología y medio ambiente, Geomorfología y geoarqueología, Geomorfología y procesos de laderas, Geomorfología fluvial, Geomorfología litoral-submarina, Geomorfología kárstica y Geomorfología glaciar), que constituyen una buena muestra del estado de la ciencia geomorfológica española en el primer cuarto del siglo XXI.

Un total de 266 autores, procedentes de 76 empresas, instituciones, universidades y centros de investigación españoles y extranjeros, han realizado un esfuerzo de síntesis para exponer algunas de las más relevantes investigaciones geomorfológicas llevadas a cabo en los últimos tiempos, dentro y fuera de nuestras fronteras.

Es importante destacar, en el capítulo de agradecimientos, el apoyo de varias instituciones y personas, sin las cuales no hubiera sido posible la edición de este libro. En primer lugar, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), y en especial el Servicio de Publicaciones, que ha tenido a bien incluirlo en su programa editorial del año 2016. Elena Vivanco contribuyó eficazmente a dar forma a este libro. También es de agradecer la impecable labor del Comité Científico de la Reunión, que revisó de manera exhaustiva los resúmenes, en primer lugar, y los trabajos completos posteriormente, para conseguir un nivel de calidad final de los trabajos homologable al de cualquier revista científica de prestigio.

Esta reunión, auspiciada por la Sociedad Española de Geomorfología (SEG), ha sido organizada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), con la inestimable ayuda de la Universidad de Málaga (UMA), a través de la Unidad Asociada existente entre el IGME y la UMA, denominada "Estudios Hidrogeológicos Avanzados".

J.J. Durán Valsero,
en representación del Comité Organizador



Cartografía geomorfológica

Innovación en la producción de cartografía geomorfológica de amplias y variadas superficies. Ecuador, un caso de éxito

Innovative geomorphological cartography generation of large and varied land areas. Ecuador, a success story

I. Barinagarrementeria[1] y A. Leránoz[2]

[1] Dpto. Sistemas de Información Territorial, Tracasa, C/ Cabárceno 6, 31621 Sarriguren (Navarra). ibarinaga@tracasa.es
[2] Dpto. Sistemas de Información Territorial, Tracasa, C/ Cabárceno 6, 31621 Sarriguren (Navarra). aleranoz@tracasa.es

Resumen: Los grandes proyectos de generación de cartografía geomorfológica demandan producir más superficie, en menos tiempo y con una calidad similar o incluso superior con respecto a cartografías tradicionales, de ahí que las metodologías y herramientas hayan aprovechado las nuevas tecnologías a su alcance para lograr este objetivo. El objetivo de este trabajo es presentar una nueva forma de producir cartografía geomorfológica, innovadora en cuanto a los modelos, herramientas y metodologías, utilizada con éxito en el proyecto de Levantamiento de Cartografía Geomorfológica a escala 1:25.000 de Ecuador realizado en el marco del Programa SIGTIERRAS del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca del Ecuador. Se han generado 122.000 km^2 de cartografía geomorfológica como insumo principal del levantamiento geopedológico, categorizando el territorio a través de un sistema jerárquico en unidades que presentan rasgos comunes, en un país que destaca por su gran diversidad geomorfológica por estar dividida en 3 regiones completamente diferentes: Costa, Sierra y Amazonía. Para abordar este gran reto se definen 221 unidades geomorfológicas y se planifican 81 salidas de campo donde se visitan y describen mediante ficha de campo digital incorporado en la Table/PC miles de puntos dispersos en el territorio ecuatoriano. Además, se diseña un sistema de trabajo basado en la tecnología ARCSDE y se apuesta por un software de trabajo innovador asentado sobre 3 pilares: 1) ArcGis; 2) Purview que proporciona visión estereo-sintética general del terreno en contraposición a los softwares tradicionales de estereoscopía; y 3) Vector Factory que facilita la búsqueda y el almacenamiento de los datos y ofrece de procesos de control de calidad internos. También se implementan programas de captura de datos, control de calidad etc. En total se generan 365 hojas de cartografía geomorfológica 1:50.000, 365 salidas gráficas, una por cada hoja 1:50.000 y 105 salidas gráficas y memorias técnicas, una por cantón. Todo ello ejecutado en un año y medio de plazo.

Palabras clave: ArcSDE, cartografía, Ecuador, geomorfología, visión estéreo-sintética.

Abstract: *Large geomorphological cartography generation projects demand to produce more land in less time and with a similar or even higher quality, therefore the tools and methodologies developed, have taken advantage of the new technologies within reach to achieve this goal. The aim of this document is to show a new way to produce geomorphological cartography, innovative in terms of models, tools and methodologies and that have been successfully used for the Geomorphological Mapping project, on 1:25.000 scale of Ecuador is produced under the Ministry*

of Agriculture, Livestock, Aquaculture and Fishing of Ecuador SIGTIERRAS Programme. As the main source for geopedological mapping, 122.000 km² of geomorphological cartography have been generated, organizing land into a hierarchical system of units that have common features, in a country where its great geomorphological diversity is especially noteworthy, since it is divided in three completely different regions: Coast, Mountain range and Amazon forest. To address this great challenge 221 geomorphological units are defined and 81 field trips are planned where points in the field were visited and described by a Digital Field Data tab included in a Tablet/PC thousands of points spread throughout Ecuador. Moreover, a working system is designed based on ARCSDE technology and are committed to the use of innovative software resting on three pillars: 1) ArcGis; 2) Purview, providing stereo-synthetic vision as a general view of the ground, as opposed to conventional stereoscopy softwares; and 3) Vector Factory, allowing easy search and data storage and offering internal quality processes. In addition, data entry programs are implemented, quality control, etc. In total, 365 geomorphological cartography sheets on 1:50.000 scale, 365 graphic outputs for each 1:50.000 sheet and 105 graphic outputs and technical reports, one per canton. All of this has been achieved in only one and a half years.

Keywords: *ArcSDE, cartography, Ecuador, geomorphology, stereo-synthetic vision.*

INTRODUCCIÓN

El 1 de febrero de 2011, la República del Ecuador y el Banco Interamericano de Desarrollo suscribieron el Contrato de Préstamo 2461/OC-EC, cuyo objetivo es la implantación en todo el país de un sistema eficiente de gestión de catastro y registro de la propiedad de la tierra rural, con el objetivo de brindar seguridad jurídica a los derechos de propiedad, apoyar la aplicación de políticas tributarias de los cantones, y proveer información para la planificación de ordenamiento territorial del área rural. El Proyecto es dirigido por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, MAGAP, a través de la Unidad Ejecutora MAGAP-PRAT, dentro del Programa denominado como SIGTIERRAS. El 9 de diciembre de 2013 la Unidad Ejecutora MAGAP PRAT suscribió con el Consorcio TRACASA-NIPSA el contrato "Levantamiento de Cartografía Temática a escala 1:25.000, Lotes 1 y 2". Se trata de realizar cartografía digital y bases de datos territoriales en un área de trabajo de unos 120.000 km² sobre: Geomorfología, Suelos, Capacidad de uso de las tierras, Dificultad de labranza, Velocidad de infiltración, Amenaza a la erosión hídrica, Cobertura y uso de la tierra, zonas homogéneas de cultivos y Sistemas productivos y finalmente modelamientos sobre Accesibilidad y Peligros volcánicos.

Los objetivos concretos de la Cartografía Geomorfológica, como generadora de uno de los principales insumos para el levantamiento edafológico, junto con el que constituye la componente Geopedológica, son:

- Generar una cartografía y base de datos asociada que permitan comprender el territorio de estudio desde el punto de vista de su relieve y paisaje físico.
- Categorizar el territorio, a través de un sistema jerárquico, en unidades que presentan rasgos y características comunes según la escala de análisis realizada.
- Disponer de una cartografía de referencia para la implementación de planes, programas y proyectos con incidencia en el territorio

ZONA DE ESTUDIO/MARCO GEOMORFOLÓGICO

Este trabajo de cartografía geomorfológica 1:25.000 se genera en 122.095 km^2 de Ecuador. Previamente a la firma del Contrato por el Consorcio TRACASA-NIPSA, la empresa pública ecuatoriana CLIRSEN (actualmente IEE, Instituto Espacial Ecuatoriano) (CLIRSEN, 2012) en coordinación con SENPLADES (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo), realizó este mismo trabajo en algunos cantones con la finalidad de poner a punto metodologías y realizar un "Catalogo de objetos" con las principales asignaciones y atributos que eran necesarios recoger en esta cartografía. Debido a la extensa superficie a cartografiar, el gobierno ecuatoriano decidió sacar a concurso público la ejecución de esta tarea que se adjudicó el Consorcio TRACASA-NIPSA.

El trabajo se ubica en la zona centro-oriental del país, abarcando pequeñas zonas de la región Costa y casi la totalidad de las regiones Sierra y Amazonía. En la figura 1 los colores azulados corresponden a dominios fisiográficos de la Costa, los anaranjados a dominios fisiográficos de la Sierra y los verdosos a dominios fisiográficos de la región Amazónica.

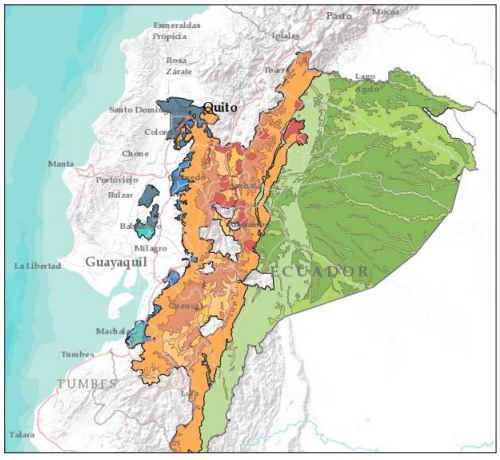


FIGURA 1. *Zona de estudio coloreada según dominios fisiográficos*

La diversidad geomorfológica del sector estudiado es muy grande debido a este contraste entre regiones. En un corte transversal de oeste a este de la zona de estudio se encuentra: la alta llanura aluvial costera; el piedemonte andino occidental formado por conos de esparcimiento y deyección que caen hacia la costa; las vertientes externas de la cordillera occidental con desniveles relativos de hasta 3000 metros; las cimas frías de la cordillera occidental con modelados glaciares; el sistema volcánico sobre relieves de fondo de cuencas interandinas; cimas frías de la cordillera oriental; vertientes externas de la cordillera oriental desarrolladas fundamentalmente sobre rocas metamórficas flanqueadas por cuerpos intrusivos; la zona sub-andina amazónica con relieves sub-montañosos sobre los que se apoya la vertiente amazónica y la Amazonía Periandina caracterizada sobre todo por los grandes conos de esparcimiento. El medio aluvial está presente en todo el territorio ecuatoriano. (Collorti y Oliver, 2000; Gutiérrez, 2008; Vera, 2013).

PROCEDIMIENTOS SEGÚN CRITERIOS GEOMORFOLÓGICOS

Teniendo en cuenta que el relieve y el paisaje físico se pueden concebir a través de un sistema que, en función de la escala espacial de referencia, permite distinguir áreas o unidades con características comunes y diferenciables de las contiguas, se ha categorizado el territorio (Winckell, 1997) a través de un sistema jerárquico en unidades que presentan rasgos comunes (de más general al de mayor detalle). De este modo se distinguen: Regiones (3 tipos), Dominios Fisiográficos (18 tipos), Contextos Morfológicos (51 tipos) y Unidades Geomorfológicas o Geoformas (221 tipos).

La unidad geomorfológica o geoforma es la unidad base del mapeo y se puede definir como una porción del territorio, identificable con respecto a las de su entorno inmediato

desde el punto de vista perceptivo, que presenta características homogéneas en cuanto a su génesis (procesos formadores), morfología (forma del terreno, del valle, de la vertiente y del drenaje), morfometría (o análisis cuantitativo del relieve: pendiente, desnivel relativo, longitud de vertiente y densidad del drenaje) y procesos morfodinámicos actuantes y material constitutivo (formación geológica o depósito superficial y litología sobre la que se asienta). Ejemplos de geoformas son: valle en V, relieve lacustre ondulado, coluvión reciente, fondo de valle glaciar, rampa de piedemonte de cono volcánico, cordón litoral, aplanamiento kárstico, colinas en media naranja, manto eólico o superficie de cuesta.

Los 15 atributos descriptivos de las unidades geomorfológicas se detallan en la tabla siguiente.

Jerarquía del paisaje	Región, dominio fisiográfico, contexto morfológico, unidad geomorfológica (geoforma)
Proceso formador	Génesis
Morfología	Forma de la cima, del valle, de la vertiente y del drenaje
Morfometría	Pendiente, desnivel relativo, longitud de vertiente y densidad del drenaje
Morfodinámica y material constitutivo	Formación/depósito superficial y litología

TABLA I. *Atributos descriptivos de las unidades geomorfológicas*

Teniendo en cuenta que el trabajo es realizado por 15 técnicos geomorfólogos, se implementan diferentes procedimientos a la metodología con el objetivo de asegurar la calidad del producto y cometer el mínimo de errores manteniendo la homogeneidad y la consistencia de la información a la hora de asignar los atributos descriptivos a las geoformas.

Las geoformas se ordenan y estructuran por grupos y subgrupos según su génesis (Fluvial, Fluvio-lacustre, Laderas, Volcánico, Marino, Kárstico, Meteorización, Eólico, Estructural, Tectónico-Erosivo, Poligénicas, Otras). De este modo se genera un menú con botones muy intuitivo y ágil que ayuda en la atribución de la geoforma deseada con el software *Vector Factory*. Además, se incorporan reglas entre la geoforma y sus atributos descriptivos, de tal manera que si existiera una conexión directa entre ellas se introduce el atributo directamente en la Geodatabase (Gdb). Como consecuencia, en el menú sólo aparecen aquellos atributos morfológicos a fotointerpretar.

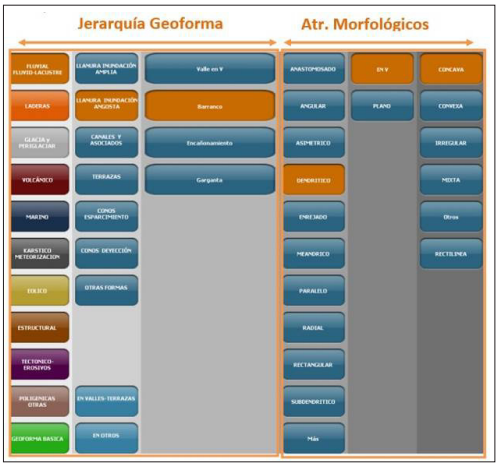


FIGURA 2. *Menú para introducir atributos en Gdb, Vector Factory*

Por otro lado, se calculan los atributos morfométricos automáticamente mediante algoritmos determinados a partir del MDT (pendiente, densidad de drenaje, longitud de vertiente y desnivel relativo).

Para el cálculo del desnivel relativo (a) y la longitud de vertiente (c) se dibuja una línea auxiliar que representa el segmento de vertiente más característico de la geoforma. Esta línea sirve de base para el cálculo de los atributos automáticos a partir del MDT.

Para el cálculo de la densidad de drenaje, se ha generado una red de drenaje mejorada con respecto a la de la cartografía 1:50.000 y 1:5.000 en la región Sierra, teniendo en cuenta que el MDT en esta zona presenta una muy buena resolución de 3 m y no existen problemas extras. Con la herramienta Arc*HydroTools*

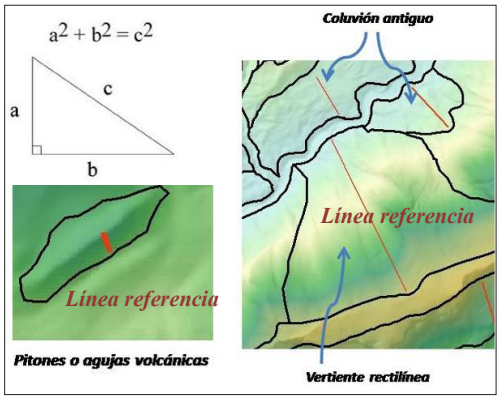


FIGURA 3. *Cálculo de atributos automáticos a partir de MDT, desnivel relativo y longitud de vertiente. Línea de referencia en color rojo*

de ArcGis, a partir del MDT y guiando la generación de la red de drenaje con la cartografía 1:5.000 (cuando exista), se ajustan los parámetros para conseguir una red con el detalle suficiente (arroyos de 3º y 4º nivel) y consistente. Por el contrario, en la Amazonía se apuesta directamente por la red de drenaje proveniente de la cartografía 1:5.000, dado que el MDT en zonas con vegetación tupida, representa la altura de los árboles en vez de la altura del suelo. Se definen los umbrales de densidad de drenaje siguiendo las pautas de Strahler, 1952.

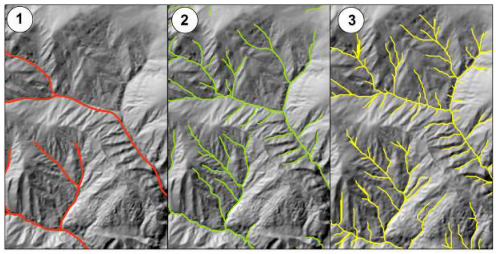


FIGURA 4. *Comparativa de la red de drenaje 1) cartografía 1:50.000, 2) cartografía 1:5.000 y 3) red drenaje mejorada del proyecto*

Además, se implementan herramientas adicionales dentro de *Vector Factory* que ayudan en la captura directa de atributos provenientes de insumos como por ejemplo el mapa geológico 1:100.000 del INIGEM o el mapa morfológico con información asociada a la jerarquización del territorio (Región, Dominio Fisiográfico, Contexto Morfológico). Al situar el cursor encima de un recinto del mapa origen, aparece una ventana con la información asociada al recinto y se añade a la Gdb a partir de un *click* sobre los mapas.

De cara al control de calidad se generan programas que verifican la correspondencia entre la unidad geomorfológica y sus atributos asociados. De tal manera que si encontrara algún tipo de incongruencia lo informaría.

DISEÑO DEL SISTEMA DE TRABAJO

Se diseña una Geodatabase (Gdb) compuesta por una *Feature Class* con dominios y 15 campos para introducir los atributos descriptivos de las geoformas que a su vez sirve de base para el diseño del modelo de datos y sistema general del proyecto.

El sistema de trabajo de la fase de fotointerpretación se basa en la tecnología ArcSDE,

componente básico de ArcGis Server. Los técnicos geomorfólogos trabajan y digitalizan sobre la misma Gdb de tal manera que cualquier recinto digitalizado aparece reflejado inmediatamente en la Gdb y es visualizado por el resto de técnicos del equipo, proveyendo al equipo de una visión integradora del trabajo y generando un producto más homogéneo y de mejor calidad. Cada recinto digitalizado tiene un propietario y nadie más puede tocarlo a no ser que se pida el permiso pertinente. Además, el administrador y las personas responsables del control de calidad acceden a la Gdb y llevan a cabo las gestiones pertinentes de control de calidad: revisión de topologías, geometría, atributos incongruentes etc.

Los datos de campo generados para verificar *in situ* las unidades geomorfológicas y sus atributos se gestionan a partir de un sistema integrado donde los técnicos preparan en la oficina los puntos a ser visitados junto con los insumos necesarios y los transfieren a la *Tablet/PC* vía *FTP*. Este sistema facilita que en cualquier momento el administrador pueda transferir información a un técnico que está en campo. Una vez realizado el trabajo de campo en Tablet/PC, las fichas digitales se transfieren a la Gdb ArcSDE vía *FTP.* De esta manera las fichas de campo son revisadas por los técnicos en gabinete y realizan los cambios pertinentes en la cartografía.

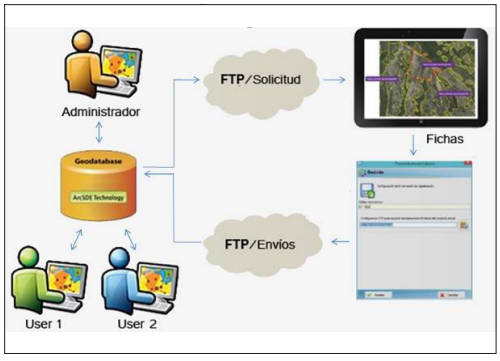


FIGURA 5. *Sistema integrado de trabajo*

SOFTWARES Y TABLET/PC

En la búsqueda de la herramienta de producción para cartografías a escala 1:25.000 se apuesta por la mejor oferta del mercado que se asienta sobre tres pilares: 1) *AcrMap*, interface de trabajo con gran potencialidad en edición y geoprocesamiento de datos; 2) *Purview*, software con visión estéreo-sintética que da la posibilidad de visualizar una zona amplia del terreno (por ejemplo hoja 1:50.000), en modo estéreo en contraposición a los softwares de estereoscopía tradicionales donde sólo se visualiza una pequeña franja. Este hecho es clave a la hora de generar una cartografía geomorfológica de calidad, ya que permite moverse y cambiar de escala para identificar las grandes estructuras y patrones del relieve y entrar en el detalle de las geoformas sin perder de vista el contexto del modelado en el que se encuentra; y 3) *Vector Factory*, software con opción de guardar datos, generar menús para facilitar la búsqueda del atributo esperado y que permite incorporar procesos de control de calidad internos.



FIGURA 6. *Purview: Visión estéreo-sintética de hoja 1:50.0000 completa*

En campo se han visitado y descrito mediante ficha de campo digital en un aplicativo GIS incorporado a una Tablet/PC, al menos un punto por cada 20 km^2. Cabe destacar el uso de tablets/PC con visualizador geográfico que

incorpora GPS, itinerarios o "tracks" y facilita la toma de datos de las fichas de campo con fotografías asociadas a cada geoforma.



FIGURA 7. *Descripción afloramiento en trabajo de campo. Detalle Tablet/PC*

Se hace especial hincapié en el control de calidad y se desarrollan programas que trabajan directamente sobre los datos guardados en la Gdb. Se revisan las posibles incongruencias entre la unidad geomorfológica y sus atributos descriptivos.

RESULTADOS

La ejecución de la generación de la cartografía geomorfológica a escala 1:25.000 de Ecuador se lleva a cabo en año y medio con un equipo de 15 técnicos geomorfólogos y 2 responsables. La tabla I. proporciona datos que muestran la magnitud del trabajo realizado.

Área (km²)	122.095
Nº recintos	68.152
Nº Salidas campo	81
Nº Fichas campo	5.965
Nº Salidas gráficas (por hoja/ cantón)	(365/105)
Memorias técnicas (por cantón)	105

TABLA II. *Datos del trabajo realizado*

En el marco principal de las salidas gráficas se representan las diferentes geoformas identificadas en el territorio a una escala 1:25.000.

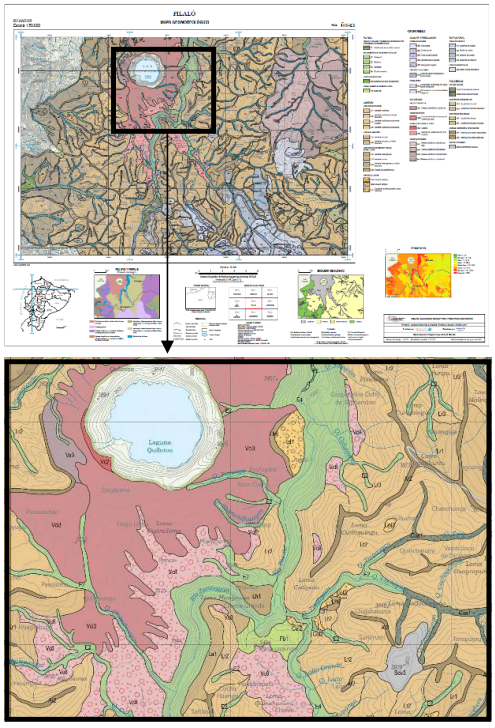


FIGURA 8. *Salida gráfica hoja 50.0000 completa y detalle*

Por otro lado, en la leyenda se muestran las distintas geoformas identificadas en el territorio que representa el mapa, ordenadas según génesis (grupos y, en su caso, subgrupos). A todas las geoformas se les asigna una clave identificativa única (de entre 2 y 4 caracteres), colores que ayuden a identificarlas en relación al grupo o subgrupo genético en el que se encuadran y, en el caso de geoformas que llevan depósitos superficiales asociados, una trama. Además se incluyen esquemas del relieve y paisaje, geológico y pendientes.

CONCLUSIONES

La generación de cartografía geomorfológica en más de la mitad del territorio de Ecuador demanda producir mucha superficie en poco tiempo y con una alta calidad, de ahí que en este proyecto se recurra a metodologías, herramientas y modelos de producción a su alcance para conseguir ese objetivo con éxito.

El uso de la visión estéreo-sintética en contraposición a otros softwares tradicionales de estereoscopía ha sido clave para generar una cartografía geomorfológica a escala 1:25.000 de calidad. Los softwares tradicionales proporcionan una visión estereoscópica de las zonas de solape entre orotofotos o en su caso entre imágenes de satélite y en muchos de los casos, estas zonas resultaban de menor tamaño que el de las propias unidades geomorfológicas a fotointerpretar (por ejemplo los enormes conos de esparcimiento de la Amazonía que presentan más de 100 kilómetros de longitud). Por eso, resultaría imposible poder abarcar un trabajo si no fuera por esta técnica.

En trabajos en equipo como el presente, compuesto por 15 técnicos geomorfólogos, el sistema de trabajo basado en la tecnología ArcSDE ha sido un éxito, ya que permite tener una visión integradora del trabajo a todo el equipo, evitando errores típicos de incoherencia entre hojas adyacentes.

Además, el hecho de poner en marcha procedimientos para ajustar al máximo la información que sirva de ayuda al fotointérprete y técnico de campo en su decisión a la hora de definir y seleccionar los atributos, ha conseguido disminuir el tiempo y aumentar la eficiencia y la producción del trabajo.

Toda la información generada sobre la geomorfología es de vital importancia para el desarrollo del País y constituye la base para la toma de decisiones sobre ordenación del territorio, riesgos naturales, realización de inversiones. Estos datos sirven de cartografía base para los mapas geopedológicos y otros estudios de diversas temáticas, etc. Es labor del Gobierno Ecuatoriano socializar esta información y ponerla en valor.

REFERENCIAS

CLIRSEN 2012. Proyecto: "Generación de Geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional, escala 1:25.000". *Geomorfología. Metodología (versión 2012)*. Informe no publicado. Quito, 36 p.

Coltorti, M. y Ollier, C.D. 2000. Geomorphic and tectonic evolution of the Ecuadorian Andes. Geomorphology, 32, 1-19

Gutiérrez, M. 2008. Geomorfología. Pearson Educación, S.A. Madrid, 898 p.

Purview de Infoterra SGSA. http://www.infoterra.es/software-purview

Strahler, A.N. 1954. Statistical analysis in geomorphic research. *J. Geology*, 62, 1-25.

Vector Factory de Infoterra SGSA. http://www.infoterra.es/software-vectorfactory

Winckell, A. (coordinador) 1997. Los paisajes naturales del Ecuador: las regiones y paisajes del Ecuador. CEDIG, IPGH, ORSTOM, IGM. Quito, 416 p. + mapa esc. 1:1.000.000.

Vera, R. 2013. Geology of Ecuador. Gráficas Iberia. Quito, 150 p.

Detección de superficies de aplanamiento mediante Modelos Digitales de Elevación: un ejemplo de análisis del relieve en los Montes Galaico-Leoneses (Noroeste de España)

Planation surfaces detection through Digital Elevation Models: an example of relief analysis in the Galaico-Leoneses Mountains (NW Spain)

A. Mínguez[1], A. Martín-Serrano[2] y E. García-Meléndez[1]

[1] Área de Geodinámica Externa, Facultad de CC. Biológicas y Ambientales, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n 24071, León. aidaminguez@gmail.com, egarm@unileon.es

[2] Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica, Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas 23, 28003, Madrid. a.martinserrano@igme.es

Resumen: Se profundiza en el conocimiento del relieve de la transición montañosa entre León y Galicia en el Noroeste peninsular. Su morfología es extremadamente quebrada con los elevados relieves de los Montes Galaico-Leoneses, la cuenca del Bierzo empotrada en su interior y el extremo noroccidental de la Meseta septentrional. Para la organización de esta orografía se han utilizado Modelos Digitales de Elevación (MDE) a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La fotointerpretación de imágenes de satélite ASTER fue un soporte fundamental que se trasladó al análisis de MDE. Este procedimiento dio lugar a mapas derivados de pendientes, orientaciones y de red de drenaje, sobre los que se aplicaron índices matemáticos de análisis. Después se señalaron los elementos geomorfológicos de referencia sobre los que reconstruir un relieve complejo. Quedó definido en veinticuatro porciones de superficies de aplanamiento virtuales y tangentes al relieve actual, con altitud, inclinación y desarrollo diferente. Estas superficies se organizaron entre ellas, para lo cual se utilizaron apoyos geológicos y geomorfológicos, litoestratigráficos para el relieve diferencial, y tectónicos para detectar la rotura y desnivelación. Se determinó una originaria duplicación inicial, perfectamente señalada en los aplanamientos más elevados: la más antigua, definida por la litología más resistente, sobre la Formación Cuarcita Armoricana, y la otra a altitud inferior, empotrada en la anterior y desarrollada sobre litologías menos competentes. La desnivelación tectónica alpina es la causante de la multiplicación de las superficies aunque se pueden constatar retoques post-tectónicos en fragmentos de aplanamientos ubicados en posición inferior y periférica a los ámbitos de sedimentación cenozoica.

Palabras clave: Geomorfología, Montes Galaico-Leoneses, superficies de aplanamiento, Sistemas de Información Geográfica, Modelos Digitales de Elevación.

Abstract: *This work aims to understand the relief belonging to a northwestern sector of the Iberian Peninsula, which has been shaped by a long and complex geomorphological evolution. Furthermore, this evolution has been greatly impacted by the interaction of concurrent exogenous and endogenous processes. Most of the southwestern area of the Leon province is taken up*

by this territory that is placed in the physical transition between the Meseta and Galicia. The extremely fractured morphology of the study is made up by the high reliefs of the Galaico-Leoneses Mountains, the Bierzo Basin and the northwestern region of the northern Meseta. A procedure based on Digital Elevation Models (DEM) relying on Geographical Information Systems (GIS) was followed in order to carry out the current analysis. This was further implemented by photointerpretation of the ASTER-satellite imagery related to the area. Derived maps were generated by this process: slope, aspect and drainage network, which was analyzed by mathematical indexes. This lead to the characterization of 24 erosional surfaces identified by the presence of virtual planes tangent to different sections of the relief, diverge in height, slope and development. All the 24-identified surfaces were linked to a common ancestral element that was previously duplicated. The original surface is defined by the most resistant lithologies and corresponds to the highest summit range lying over the Cuarcita Armoricana formation. Meanwhile, the duplicated surface, displaying a lower altitude, is embedded in the original one and is developed over less competent lithologies. The subsequent breakage of these two elements by the Alpine tectonic deformation lead to the generation of the 24 surfaces scattered through different levels.

Key words: *Geomorphology, Galaico-Leoneses Mountains, planation surfaces, Geographical Information Systems, Digital Elevation Models.*

INTRODUCCIÓN

La transición montañosa entre la Meseta y Galicia es un relieve extremadamente complejo y quebrado, con los Montes Galaico-Leoneses, la cuenca del Bierzo empotrada en su interior y el extremo noroccidental de la Meseta. Se ubica en el noroeste de la cuenca del Duero y la terminación oeste de la Cordillera Pirenaico-Cantábrica, formando a su vez parte del Macizo Ibérico (Fig. 1). La pasada investigación de este territorio desde diferentes enfoques geológicos y geomorfológicos ha arrojado un balance muy desigual y sujeto a las más variadas interpretaciones, por la falta de apoyo paleontológico, geocronológico y por la carencia de estudios en geología estructural.

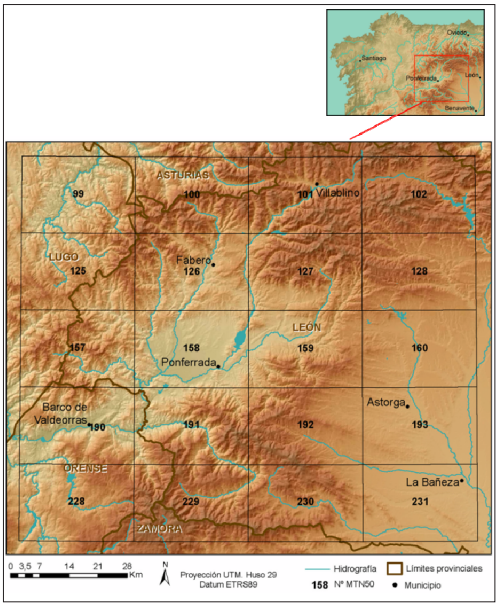


FIGURA 1. *Localización de la zona de estudio en el noroeste de la Península Ibérica*

La pretensión de este trabajo es la de avanzar en la recomposición de la compleja orografía que aglutina en un mismo territorio conceptos tan contrapuestos como relieve y aplanamientos. Proceder a la jerarquización y organización del elemento geomorfológico regional más común, las superficies de ero-

sión, podría ser una interesante aportación. Porque para abordar esta tarea se cuenta con el apoyo de los conocimientos acumulados de la suma de estudios y observaciones geológicas y geomorfológicas durante casi un siglo de investigación en esta región, pero también porque se cuenta con nuevas técnicas de análisis mediante el uso de los SIG, nunca utilizadas aquí.

MÉTODO

En la irregularidad de este conjunto orográfico, lleno de elementos morfológicos dispares, hay un rasgo repetido sobre el que se han edificado todas las interpretaciones: los restos de superficies de erosión. Éstas no ha sido el único, pero sí uno de los apoyos más importantes sobre los que se han sustentado la mayoría de las reconstrucciones geodinámicas regionales. Se conocen desde antiguo y ya entonces fueron simplistamente utilizadas para remontarse a los orígenes de estas montañas o para estudiar en detalle áreas de dimensión más reducida.

En este trabajo se persigue, aplicando técnicas basadas en SIG, pero también aportaciones de la geología y la geomorfología propias y ajenas, organizar la compleja morfología de este territorio. En este sentido los MDE fueron esenciales para llevar a cabo el minucioso análisis que permitió localizar superficies de aplanamiento y establecer las relaciones entre ellas para determinar la organización del relieve de este sector (Mínguez, 2015).

También se realizaron análisis morfográficos y morfológicos mediante imágenes de satélite ASTER apoyadas con trabajo de campo. La fotointerpretación de las imágenes citadas a escala 1:200.000, permitió ampliar los conocimientos morfológicos de la región de forma global y a gran escala. Paralelamente, con MDE de distinta resolución espacial (90, 25 y 5 m de resolución), se obtuvieron mapas derivados de alturas, pendientes, orientaciones, sombreado, para comprender y ubicar los elementos geomorfológicos y localizar áreas aplanadas.

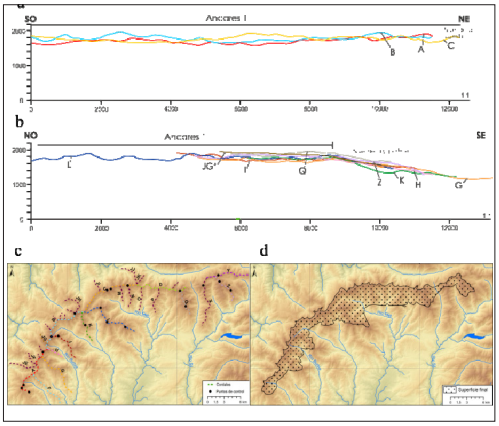


FIGURA 2. *Representación gráfica del análisis de los perfiles topográficos estudiados para la delimitación de la superficie Ancares 1. a. Perfiles correspondientes a los cordales que siguen una dirección SO-NE. b. Representación de los cordales secundarios que siguen una dirección NO-SE. c. Localización geográfica de los perfiles sobre los que se ubican los puntos de control para cada superficie (picos a igual altitud, cambio brusco de pendiente, etc.). d. superficie de aplanamiento definitiva cartografiada a partir de los puntos de control*

Con toda esta información se llevó a cabo un trabajo sistemático de localización de cordales, sierras y picos de los que se generaron perfiles topográficos gracias a la información proporcionada por los MDE. En total se analizaron 227 perfiles a lo largo de más de 2000 km de longitud, en cuatro sectores, en 10 áreas montañosas. En perfiles próximos y/o adyacentes se localizaron situaciones similares, concordancia de pendientes, cambios bruscos de inclinación, etc. que fueron representados cartográficamente como puntos de control. A partir de ellos llegó el trazado de superficies teóricas de aplanamiento (Fig. 2), es decir, planos de los que hoy en día solo se conservan restos aislados, pero que su reconstrucción permite visualizar los aplanamientos previos,

actualmente fragmentados, desmantelados y erosionados. Por último, se estableció un valor de pendiente y orientación para cada una de estas superficies cartografiadas mediante el estudio de superficies de tendencia, de forma que pudieron compararse y relacionarse entre sí todas ellas.

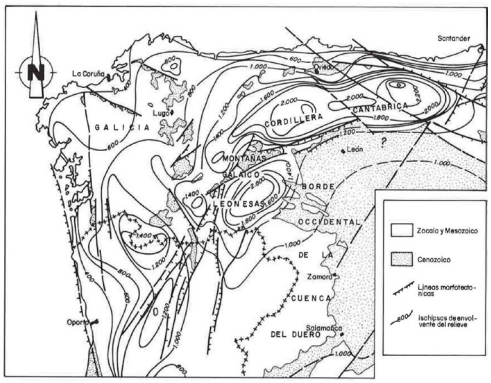


FIGURA 3. *Bóveda montañosa del Noroeste realizada por Martín-Serrano (1994*)

Acompañando a este análisis, e inspirado en la Bóveda montañosa del Noroeste propuesta por Martín-Serrano (1994) (Fig. 3), se generó una superficie sintética del terreno de forma semiautomática mediante interpolación (método *Natural Neighbor*) de los valores de altitud tomados en las partes exteriores de los principales relieves. De esta forma se creó una capa continua en donde quedan reflejadas las tendencias morfológicas generales de la región, sin tener en cuenta la incisión de la red fluvial actual.

RESULTADOS

Análisis general. El resultado global del análisis de las superficies de erosión detectadas en las montañas galaico-leonesas es un mapa en el que quedan plasmados veinticuatro fragmentos de planos virtuales (Fig. 4), que han sido reconstruidos a partir de unos cuantos apoyos determinados mediante grupos de cumbres niveladas por planos tangentes más o menos inclinados. Como se observa en el gráfico resultante, las superficies de aplanamiento quedan agrupadas en torno a la cuenca del Bierzo.

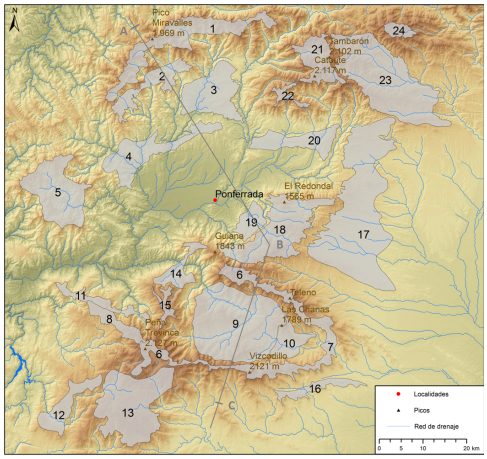


FIGURA 4. *Superficies de aplanamiento cartografiadas en el este trabajo. Superficies: 1. Ancares 1 (1900 m), 2. Ancares 2 (1500 m), 3. Fabero (1100 m), 4. Villafranca (1000 m), 5. Caurel (1500-1600 m), 6. Cabrera 1 oeste (2100 m), 7. Cabrera 1 este (1500-2000 m), 8. Eje 1 (1500-1800 m), 9. Cabrera 2 oeste (1600-1700 m), 10. Cabrera 2 este (1400-1700 m), 11. Eje 2 (1400 m), 12. Pías (1600 m), 13. Sanabria (1800 m), 14. Llamas (1300 m), 15. Aquilianos (1500 m), 16. Cova (1800 m), 17. Brañuelas (1500 m), 18. Montes (1500 m), 19. Valdueza (1100-1000 m), 20. Noceda (1000-1300 m), 21. Vizbueno (2100 m), 22. Gistredo (1800 m), 23. Omaña (1400-1800 m), 24. Luna (2100 m).ABC. Perfil morfológico figura 6*

La inicial organización altitudinal, una primera y simplista forma de abordar el análisis de todas las hipotéticas superficies de erosión detectadas, tiene en la superficie sintética del terreno un elemento de comparación interesante. El relieve sintetizado de la figura 3 señala con claridad una estructura anticlinal incompleta y fragmentada, la denominada Bóveda montañosa del Noroeste (Martín-Serrano, 1994). Dicha bóveda, formada por las montañas galaico-leonesas que se curvan y prolongan hacia la Cordillera Cantábrica, tienen una zona axial hundida que es la depresión del Bierzo. Se trata de un esbozo de anticlinal

orográfico que sintetiza la deformación alpina ocurrida en esa región. La concordancia del gráfico con algunos accidentes estructurales conocidos indica que esa simplificación anticlinal está articulada mediante fracturación. En este sentido, la cartografía de superficies de erosión virtual realizada en este trabajo ayuda a comprender globalmente el sentido de dicha deformación, pues se trata de un conjunto poligonal desagrupado. A partir de los elementos cartográficos constituidos por los fragmentos de planos y sus relaciones específicamente tectónicas, y datos asociados fundamentales, como los valores de inclinación de los mismos, prácticamente se obtiene una reconstrucción paralela. La orla periférica en que se disponen las superficies de erosión en torno a la depresión del Bierzo, referencia central de la morfoestructura, es un calco descompuesto de la misma. Por esta razón, resulta evidente que la localización e inclinación de las superficies y su fragmentación, están relacionadas con esa macrodeformación plasmada en la superficie sintética del terreno. Proyectando desde ambos lados de la morfoestructura, por encima del hoyo del Bierzo, los elementos, tanto del mapa de superficies como del de síntesis teórica, se dibuja un esbozo simplificado resultante de la deformación alpina señalada por las montañas de León. Una superficie plana, abovedada y alargada en dirección NNE-SSO. Una morfoestructura ligeramente asimétrica, más tendida hacia el SSE, ya que el arco transversal que llega a alcanzar cotas cercanas a los 2100 m en su parte cenital, se dibuja de E a O, entre los 1000 y 1500 m.

Las roturas por deformación. La identificación de fragmentos de superficies de erosión del territorio y su posterior contextualización con el establecimiento de relaciones entre ellas, ha confirmado que este hecho se produce de una manera directa. No es un efecto indirecto, como podría ser un desarrollo policíclico de superficies encajadas unas sobre las otras fruto de un rejuvenecimiento regional sino directo, por fractura. La articulación entre superficies es de índole específicamente tectónica. Las relaciones lineales, muy raramente rectilíneas, escalonadas y, casi siempre, apoyadas con trazados estructurales, recopilados en la información geológica, o deducidos mediante el análisis de imágenes aéreas o espaciales, han sido los argumentos utilizados. Apoyos, como inclinaciones-tendencia contrapuestas, anomalías en las cuencas, en el trazado y en los perfiles longitudinales de los ríos que las atraviesan o en las propias inclinaciones generales de los aplanamientos han reforzado esta conclusión. El 70%, (16 de las 24 relaciones estudiadas), ha sido atribuido a desniveles o separaciones producidos por roturas tectónicas. La mayoría de ellas son grandes cabalgamientos, contornean e individualizan cada bloque que porta su superficie correspondiente. Se acepta que los depósitos terciarios de esta región están limitados y afectados por fallas alpinas que controlan su ubicación y su extensión, se tiene que admitir que la mayoría de los volúmenes montañosos son consecuencia de ello y que relieves resultantes de orogenias anteriores, como la Varisca, tienen una importancia secundaria. Aunque esas roturas están directamente relacionadas con unas pocas familias de fallas, de sus mutuas interferencias resultan no pocas veces trazados caprichosos y complejos que han dificultado la identificación estructural de los desniveles. Entre otras cosas porque, aunque es un hecho que la tectónica alpina influye directamente en la orografía, no son frecuentes rasgos morfoestructurales en buen estado de conservación directamente con ella relacionados. Los escarpes de falla no suelen ser reconocibles puesto que se presentan gastados y con bastante retroceso. Por el contrario, los valles lineales, inscritos en fallas, habituales en el sur, y ligados a dirección NNE-SSO o NE-SO.

Para Martín González y Heredia (2011), el límite norte berciano está ubicado en el borde

meridional de la terminación de la cadena cantábrica y por tanto, sujeto a su empuje hacia el sur. Se concreta en las sierras de Ancares y Caurel, elevadas hacia el sur por estructuras cabalgantes E-O. Por tanto, la cuenca del Bierzo y otras satélites, como Noceda, Fabero y Paradaseca, están limitadas por cabalgamientos con esta dirección con una estructura en bloque hundido. Los cabalgamientos más próximos a la depresión (Paradaseca, Tombrío y Bembibre), han roto el registro sedimentario cenozoico elevando los bloques septentrionales. Esa franja está formada por una secuencia de cabalgamientos imbricados de dirección E-O y vergencia sur. El resultado es el afloramiento irregular y disperso del cenozoico del borde septentrional del Bierzo, elevado sobre el conjunto cenozoico principal de la cuenca en la depresión de Ponferrada.

En ese contexto estructural es donde se ubican las superficies Ancares 1, Ancares 2, Fabero, Vizbueno, Luna, Omaña, Noceda y el norte de Brañuelas. La batería de cabalgamientos alpinos a que se ha hecho mención (Travesas-Balboa, Noceda, Tombrío y Brañuelas) (Fig. 5) y sus imbricaciones secundarias, presentan una relación cartográfica relativamente directa y con una aceptable concordancia con el dibujo de las superficies que manifiesta una relación tectónica.

En el sector meridional también hay accidentes alpinos con orientación similar a los septentrionales pero de vergencia contraria, que elevan la región del Teleno sobre el Bierzo. El más importante se prolonga desde La Bañeza, hasta las Médulas de Carucedo, bordeando el flanco norte del sinclinal de Truchas (Fig. 5). Produce la elevación del Teleno sobre las superficies de Valdueza, Montes y Brañuelas. Esta estructura frontal que aproxima los Montes de León a la Codillera Cantábrica, se arquea a la altura de las Médulas, afectándolas y limitándolas por el oeste, hasta adquirir dirección NE-SO. Muy cerca de allí, las Médulas de Santalla se encuentran cobijadas por un cabalgamiento paralelo al anterior con un salto superior a los 400 m (Martín-González y Heredia, 2011). El rango del desnivel en uno y otro caso podría ser comparable con las estimaciones realizadas en este trabajo entre las superficies de erosión Cabrera 2 y Montes. En este sector sur también existen cabalgamientos que afectan al registro cenozoico de la cuenca del Bierzo. El de Molinaseca, con 40º de buzamiento y vergencia norte (Fig. 5), constituye el límite sur de ésta y levantando sobre ella las montañas donde se ubican las superficies Montes y Valdueza.

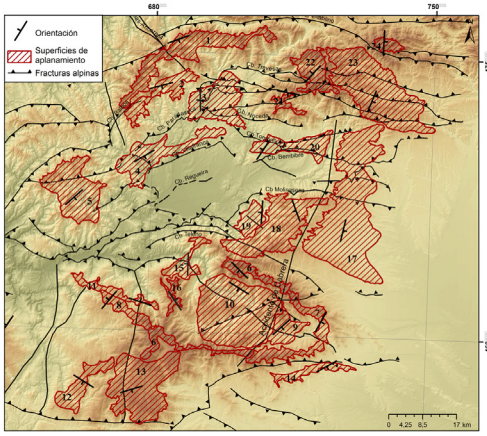


FIGURA 5. *Las superficies de aplanamiento definidas en este trabajo y su relación con los accidentes tectónicos regionales*

En la región meridional, los grandes cabalgamientos vergentes al norte coexisten con grandes fallas de desgarre, de dirección NE-SO o NNE-SSO, con las que están relacionados, al compensarse parte de su desplazamiento en estos accidentes nordportugueses. La elongación de la subcuenca de Ponferrada, limitada por dos fallas con esa dirección, y la morfología de las montañas galaico-leonesas dibujan la dirección NE-SO, lo mismo que el escalón morfológico determinado por la alineación de las superficies de Villafranca y Caurel sobre la depresión de Ponferrada. La alineación NNE-SSO a la altura

de los picos Teleno y Vizcodillo tiene especial incidencia sobre el Sinclinal de Truchas, pues diferencia las superficies sobre él distinguidas. Por tanto, las relaciones entre esas superficies señalan un accidente al menos 35 km entre la Carballeda y la cuenca de Bembibre, no señalado geológicamente que inclina toda la ladera oriental. Ni está señalado sobre los mapas geológicos ni tampoco existe ningún accidente geográfico que lo insinúe.

Los desniveles producidos por los cabalgamientos geológicamente valorados en varios centenares de metros, son de rango similar al deducido por el escalonamiento entre superficies tiene coherencia (Fig. 6). El valor de inclinación de las superficies, es un vínculo más complejo. Lo más común es que la inclinación de la mayoría de las superficies sea muy bajo, inferior a un grado y que esté dirigida hacia la cuenca del Bierzo. Esta inclinación coherente con el drenaje regional, no puede ser producto de una regradación de las superficies originales con posterioridad a su desnivel por retoques condicionados y relacionados con la erosión periférica simultánea al relleno sedimentario, porque hacia éste están limitados por un salto importante. Se impone pues una interpretación tectónica con inclinaciones definidas en cada salto originado por el tren de cabalgamientos sucesivos apilados hacia el sur, unos sobre otros.

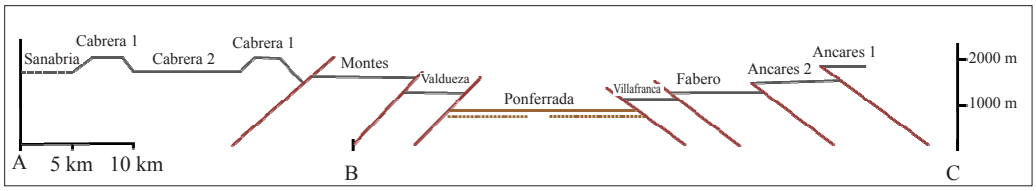


FIGURA 6. *Corte geomorfológico transversal a la morfoestructura galaico-leonesa según el perfil indicado en la figura 5*

Duplicación de la superficie original y retoques sin y post-orogénicos. La relación entre algunas altas superficies es puramente litoestructural pues sus contornos siguen el dibujo de su estructura geológica. Están unas, sobre rocas blandas, inscritas en las otras, sobre cuarcita, presentándose esta última sobre las cumbres más altas. Las diferencias altimétricas de estas superficies definidas por erosión diferencial, presentan valores entre 300 y 200 m. Esa duplicidad en las cumbres leonesas tiene continuidad descendente hacia el sureste, en Zamora, allí, donde el plegamiento se aprieta, señala un relieve previo de tipo apalachiano con nivel de cumbres y superficie grabada (García-Abbad y Martín-Serrano, 1980). Es una duplicidad repetida en otros lugares del Macizo Ibérico, un desdoblamiento previo a la orogenia alpina que se repite en todos aquellos lugares donde existe registro estratigráfico varisco de rocas más y menos competentes, representadas aquellas, por la cuarcita armoricana *sensu lato*. Aunque existen otros ejemplos en la región (Sierra del Eje, Sanabria), incluso definiendo relieve apalachiano (Brañuelas y Caurel), las de La Cabrera son las mejor definidas.

En el Macizo Ibérico existe constancia de superficies de erosión intra y post-orogénicas ligadas a la periferia de las cuencas de sedimentación cenozoicas. Suelen ser retoques muy limitados, estrechamente relacionadas con determinados episodios sedimentarios bordeando la periferia del Bierzo. Se han detectado tres superficies con posibles y ligeros retoques intra o post-alpinos: Valdueza, Villafranca y Noceda. En las tres existen argumentos suficientes como para admitir una regradación ligada al relleno sedimentario de la cuenca del Bierzo pero en ninguno de los

casos afecta a más del 15% de su superficie. Es por tanto el plano prealpino originario.

CONCLUSIONES

La definición, agrupación y organización de los vestigios de superficies de erosión a través de su articulación, con apoyos litológicos, tectónicos e hidrográficos ha supuesto avanzar sustancialmente en el conocimiento regional. Avance sustentado en cuatro hechos fundamentales:

1- La deformación global del territorio estudiado se refleja en su orografía, aunque queda enmascarada en ésta, muy afectada por los fenómenos de erosión, por rejuvenecimiento regional. En ese sentido, la superficie sintética (Fig. 7) que prescinde de lo afectado por la erosión, permite visualizar el resultado alpino. Se trata de una macrodeformación de gran radio con una estructura anticlinal incompleta con dirección NE-SO, que se descompone en un grupo de pequeñas parcelas territoriales aplanadas y articuladas por varios sistemas de fallas.

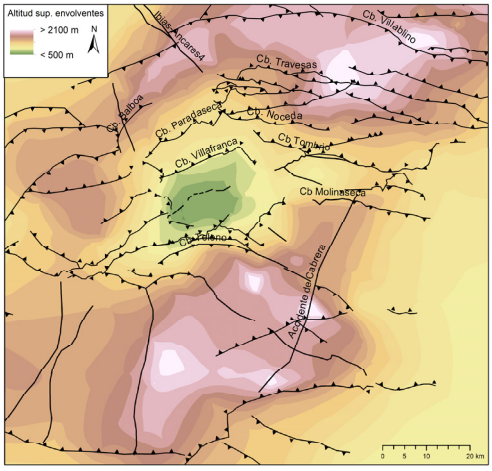


FIGURA 7. *Superficie sintética del terreno en donde se aprecian las tendencias generales del relieve en esta región y permite establecer relación con las superficies de aplanamiento cartografiadas*

2- Las roturas lo son por deformación tectónica alpina, pirenaica primero y bética después. Es una implicación tectónica directa confirmada por la articulación entre superficies de naturaleza estructural. Los cabalgamientos y fallas individualizan, rompiendo y desnivelando, la mayoría de las superficies, de la misma forma y al mismo tiempo que implican también al registro de la cuenca, controlando su sedimentación y deformándola posteriormente.

Se ratificaron fallas y roturas señaladas por las referencias tectónicas regionales pero también se han hallado algunos corredores estructurales alpinos a partir del estudio realizado como el Teleno-Vizcodillo, accidente-bisagra de 35 km con dirección NNE-SSO, donde se materializa la inflexión de toda la fachada oriental de los Montes de León.

3- Se constata la duplicación de la superficie original, previa a la orogenia alpina. En Zamora, un registro atribuido al Cretácico superior-Paleógeno (Solé, 1958) fosiliza una superficie duplicada con dos referencias: el nivel de cumbres y la superficie grabada. Su continuidad morfoestructural hacia las cumbres de la Cabrera, las correlaciona con ellas.

4- La generación de superficies de erosión en periodo intra y pos-orogénico es muy difícil. La regradación o retoques policíclicos parciales ligados a esas etapas tiene una incidencia muy secundaria, y siempre con ubicación muy concreta, como la periferia de las cuencas de sedimentación cenozoicas. Por eso, estos retoques se encuentran ligados al entorno de la cuenca del Bierzo, es decir, a las superficies de Villafranca, Noceda y Valdueza, y a las del borde oriental de los Montes de León como Brañuelas. Tales modificaciones son difíciles de detectar porque las relaciones actuales entre el registro sedimentario y su borde suelen ser tectónicas a través de importantes cabalgamientos. Es así en toda la periferia de la cuen-

ca del Bierzo, acotada por sendos accidentes alpinos.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el Proyecto de Investigación Consolider-Ingenio TOPOIBERIA 2010 CSD2006-041 Geociencias en Iberia y por el Proyecto de Investigación LE311A12-2 de la JCyL "Análisis y evolución de los relieves de la Cuenca del Bierzo y zonas adyacentes".

REFERENCIAS

García Abbad, F. y Martín-Serrano, Á. 1980. Precisiones sobre la génesis y cronología de los relieves apalachianos del Macizo Hespérico (Meseta Central Española). *Est. Geol*., 36, 391-401.

Martín-González, F. y Heredia, N. 2011a. Complex tectonic and tectonostratigraphic evolution of an Alpine foreland basin: The western Duero Basin and the related Tertiary depression of the NW Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 502: 75-89.

Martín-Serrano, Á. 1989. Rasgos generales y problemática de las superficies de erosión en Galicia. *Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 14: 7-18.

Mínguez, A. 2015. *Análisis y evolución del relieve de los Montes de León y del sector occidental de la Cordillera Cantábrica mediante la aplicación de Modelos Digitales de Elevación*. Tesis Doctoral (inédita). 312 pp.

Solé Sabarís, L. 1958. Observaciones sobre la edad de la penillanura fundamental de la Meseta española en el sector de Zamora. *Breviora Geol. Astúrica*, 2 (1-2): 3-8.

Geomorfología en el primer Mapa Geológico realizado en España

Geomorphology in the first Geological Map made in Spain

Á. Martín-Serrano García [1] y E. Boixereu y Vila [2]

[1] Dpto. de Investigación y Prospectiva Geocientífica, Instituto Geológico y Minero de España. a.martinserrano@igme.es
[2] Dpto. de Recursos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España. e.boixereu@igme.es

Resumen: En 1833 Frédéric Le Play (1806-1882), un joven y brillante ingeniero de minas, viajó a España para elaborar un mapa geológico y estadístico de la Península. Recorrió el territorio extremeño y parte de Andalucía, concluyendo el primer Mapa Geológico conocido en España, una aportación excepcional en la que incluyó también aspectos geomorfológicos que sorprenden por adelantados a su tiempo.

Le Play describió el relieve extremeño, interpretándolo con una extraordinaria lucidez. Se refiere a elementos geomorfológicos y conceptos acuñados más de medio siglo después por Davis, pero sobre todo destacan dos interpretaciones, extraordinarias para la época en que las realizó:

– La reflexión sobre las cadenas montañosas y el *plateau* asociado, indicando que apoyándose en las observaciones realizadas en Extremadura, no se habría tenido jamás la idea de atribuir el origen de las montañas a la sola causa del arrugamiento de la corteza del globo. La cuarcita, por su dureza, es la roca más importante en el relieve regional, pues forman la cima de las montañas. Utiliza ese argumento para afirmar que la formación de las cadenas y la nivelación del *plateau*, son posteriores a la deformación que afecta a los estratos por lo que con ello ordena cronológicamente *plegamiento* y *elaboración del relieve***.** Concluye que es una corrosión de la superficie primitiva del suelo que afecta más a unas rocas que otras, es decir, alude al concepto de *erosión diferencial*.

– La interpretación del berrocal del granito de Malpartida, aclarando que se trata de una *disyunción en bolos o esferoidal* de la masa granítica afectada *por meteorización* en sus zonas más vulnerables. Realiza una argumentación impecable, añadiendo una ingeniosa relación entre granitos de similar composición a partir de su grado de deterioro como elemento útil de correlación cronoestratigráfica.

Le Play, no resalta ninguna aportación, aunque son ideas adelantadas a su tiempo y precursoras de conceptos y términos geomorfológicos, probablemente porque no fue consciente de ello.

Palabras clave: erosión diferencial, extremadura, historia de la geomorfología, le Play, macizo antiguo.

Abstract: *In 1833 Frederic Le Play (1806-1882), mining engineer, travels to Spain to develop a geological and statistical map of the Peninsula. Extremadura travels territory and part of Andalusia, concluding the first geological map known in Spain, exceptional contribution also*

includes geomorphological aspects that surprise ahead of their time. Le Play describes the relief of Extremadura, interpreting it with extraordinary clarity. It refers to geomorphological features and concepts coined more than half a century later by Davis, but mostly are two interpretations, extraordinary for the time when he made:

– *The Reflection on mountain ranges and associated plateau, indicating that relying on observations made in Extremadura, would not have ever had the idea of attributing the origin of the mountains to the single cause of wrinkling of the crust of the globe. Quartzite, for its hardness, is the most important in the regional relief rock, they form the top of the mountains. Use this argument to assert that the formation of chains and leveling the plateau, postdate deformation affecting strata so that this chronologically ordered folding and processing of the relief. Concludes that corrosion is a primitive soil surface rocks affects more than others, ie, it refers to the concept of differential erosion.*
– *The Interpretation of Berrocal granite Malpartida, clarifying that this is a bolus or spheroidal disjunction of the granitic mass affected by weathering in the most vulnerable areas. Make an impeccable argument, adding an ingenious relationship between granites of similar composition from its degree of impairment as a useful element of stratigraphic correlation.*

Le Play, does not highlight any contribution, although they are ideas ahead of their time and geomorphological precursor of concepts and terms, probably because it was not aware of it.

Key words: *ancient massif, differential erosion, extremadura, history of geomorphology, le Play.*

INTRODUCCIÓN

En la primera mitad del siglo XIX en España tuvo lugar un espectacular desarrollo minero. En este contexto, hacia 1831, la Dirección General de Minas propuso un plan precoz para realizar la cartografía geológica nacional y solicitó al ingeniero de minas francés Frédéric Le Play, que realizara un informe sobre este tema. Lamentablemente, éste informe está perdido. De todas formas, Frédéric le Play visitó el Sur de España durante el año 1833 y publicó dos extensos artículos en la revista *Annales des Mines* sobre la geología y minería del suroeste de España (Le Play, 1834 a y b), en los que incluye una magnífica cartografía geológica de la región (Boixereu, 2016).

El primero de ellos se titula *"Itinéraire d'un voyage en Espagne, précédeé d'un aperçu sur l'état actuel et sur l'avenir de l'industrie minérale dans ce pays"*, un extracto de un informe, más extenso, que había presentado al Director General de Puentes, Caminos y Minas de Francia (Le Play, 1834a). El texto empieza con una reseña de la evolución histórica de la minería de España, seguida de una detallada valoración del estado de la cuestión y que finaliza con el relato sobre su viaje en las que también plasma sus observaciones geológicas, mostrado en forma de itinerario. Se acompaña de una lámina con seis grabados sobre paisajes. Describe con detalle la litología de los terrenos del recorrido y todo tipo de observaciones geológicas, como los mecanismos de la alteración de los granitos, pero sobre todo, hace hincapié en los datos sobre todo tipo de lineamientos para definir el sistema de levantamiento de montañas. Aporta consideraciones de toda índole que puedan servir para el posible establecimiento de industria en la zona, como son las comunicaciones, el suministro de combustibles, o la demografía. Este

estudio, tuvo una gran difusión internacional en la prensa científica y fue traducido a varios idiomas.

El segundo artículo es la monografía titulada *"Observations sur l'Estramadure et le nord d'Andalousie, et essai d'une carte géologique de cette contrée"* (Le Play, 1834b). Consta de una memoria de 117 páginas acompañada de tres láminas desplegables con las ilustraciones. En la primera lámina se representa el mapa geológico a escala 1:1.000.000, a todo color (Fig. 1). La segunda lámina incluye cuatro cortes geológicos, también a todo color; unos dibujos sobre la evolución de la alteración de los granitos en Malpartida de Cáceres (Fig. 2), un panorama de 360º de la comarca de La Serena, un esquema interpretativo sobre su hipótesis del levantamiento de montañas y un diagrama interpretativo sobre los lineamientos estructurales. La última lámina contiene seis grabados de paisajes dibujados directamente del natural durante el transcurso del viaje.

En el presente artículo se analizan las observaciones geomorfológicas que se encuentran en ambos trabajos que sorprenden por adelantados a su tiempo.

DESCRIPCIÓN TERRITORIAL

La descripción del territorio por él estudiado es un completísimo y ordenado análisis morfológico. Lo divide en plateaux (Extremadura), valles y llanuras (del Guadiana y del Guadalquivir) y montañas (Sierra Morena y las sierras extremeñas), las grandes unidades identificadas hoy día. Pormenoriza en cada una de ellas, señalando multitud de observaciones de carácter geomorfológico e interpretaciones sobre el relieve.

Plateaux

Para el autor, Extremadura es un *plateau* insensiblemente inclinado hacia el O-SO. Enseguida insinúa el carácter de superficie de erosión del mismo, ya que indica que la superficie del suelo está formada por antiguos estratos muy inclinados y rocas cristalinas, sin apenas diferencia de nivel. Se refiere a que el territorio está definido por ligeras ondulaciones con resultado de un plano perfectamente unido, con lo que sin saberlo está definiendo,, una penillanura, cuyo término se acuñaría más de medio siglo después. Añade que sobre este horizonte plano se levantan muy netamente las cadenas de montañas.

Señala el encajamiento de los ríos, pues discurren incididos unos 50/60 m, formando valles estrechos y profundos. Le Play, está indicando con esta descripción el rejuvenecimiento de la penillanura extremeña.

Vallèes et plaines

Destaca el hundimiento de la cuenca de Guadiana en relación al *plateau* extremeño y el encajamiento, unos 90 m, del río Guadiana antes de alcanzar el Cenozoico. Con la entrada en la cuenca cenozoica, los escarpes desaparecen y las planicies acaban por estar al nivel del río. Indica también que el citado terreno terciario se eleva muy por encima del río, llegándose a formar fragmentos de plataformas elevadas 60 m por encima del mismo.

Del río Tajo destaca un encajamiento más profundo que el Guadiana, sin planicie aluvial alguna e insinúa la *problemática de su trazado*, la que hoy día es planteada mediante fenómenos de antecedencia, sobreimposición o erosión remontante.

Le Play se refiere al contexto diferente del río Guadalquivir, haciendo referencia a su llanura de inundación o terrazas más modernas que llama *plaines*. Tiene una curiosa forma de señalar el límite entre las regiones extremeña y andaluza mediante la oposición de colores que distingue los terrenos antiguos de Extre-

madura de las formaciones cenozoicas y por el escalón que constituye este borde del *plateau* extremeño. La primera delimitación meridional del Macizo Varisco.

Menciona también algunos valles o depresiones secundarias, destacando el Valle de Alcudia, con macizos graníticos dominados por colinas de rocas esquistosas, es decir hace alusión al papel de la erosión diferencial.

Montagnes

Aquí es muy exhaustivo, porque señala que las montañas son muy numerosas y variadas. Las relaciona con "movimientos del terreno" muy suaves (se entiende que se refiere a la suavidad del plegamiento) que desaparecen sobre el *plateau central*. Remarca que en las proximidades de estas montañas la importancia del *plateau* pasa a ser rasgo secundario de la fisonomía regional. Resalta intencionadamente el contraste entre ambas morfoestructuras, *plateau* y montañas.

Incide en el carácter diferenciado de las cadenas aisladas de la Extremadura Central, en su pequeña dimensión y en su misma altitud (isoaltitud de la línea de cumbres). Recalca que en contraposición a las montañas el *plateau* es dominante de la región; las cadenas, aisladas entre sí, son accidentes en ese *plateau,* por lo que está definiendo el carácter de *penillanura* de la mayor parte de Extremadura. Las cadenas montañosas que sobre ella aparecen son inselbergs asociados o inselbergs lineales.

Sierra Morena la considera de primer rango, por su altitud y extensión. Dice que su suelo es muy accidentado pero con tendencia a la nivelación. Encuentra fragmentos de altiplanicies comparables a los que existen cerca del Guadiana y a aquellas, las distingue de éstas últimas, en que tienen formas más redondeadas. Añade que, tanto es así, que cuando observó por primera vez esta región no acabó de creerse que estaba en otra diferente. Cuando escribe gráficamente, que vistas en el horizonte, estas montañas tienen la apariencia de un mar agitado, está sentando las bases del carácter apalachiano del relieve de Sierra Morena, definiendo su línea de cumbres aplanada. Además tiene la lucidez de correlacionarla con la de las cumbres de las cadenas aisladas de Extremadura. Su conclusión sobre este macizo es que es relativamente complejo y que todo él debe estar relacionado con un gran movimiento del suelo que ha dado a este conjunto una dirección ENE dominante. Se está refiriendo al abombamiento o flexión con el que hoy día se relaciona Sierra Morena.

En la Sierra de Guadalupe aunque no se refiere explícitamente a sus cumbres niveladas ya traza las líneas maestras de lo que más tarde se ha definido como el relieve apalachiano de las Villuercas.

Resulta curioso que el resumen de este exhaustivo trabajo es muy escueto y hasta banal. Simplemente se refiere al carácter de *plateau* de Extremadura, a la existencia, hundidas en ella, de las cuencas del Guadiana; y ya fuera de ese contexto, del Guadalquivir; de Sierra Morena que corona la arista meridional del plateau; y la existencia de un conjunto de cadenas aisladas que dan carácter a la región.

APORTACIONES GEOMORFOLÓGICAS RELACIONADAS CON LAS DOS ROCAS MÁS DESTACADAS DE LA GEOLOGÍA EXTREMEÑA: GRANITOS Y CUARCITAS

Desde una perspectiva geomorfológica, no menos interesantes resultan algunas contribuciones ligadas a afloramientos que observa. Destacan específicamente dos: al berrocal del granito de Malpartida y a las sierras constituidas por cuarcitas.

La interpretación del berrocal del granito de Malpartida es perfecta. Primeramente, alerta sobre el confuso aspecto de rocas aparentemente redondeadas, despegadas del sustrato y apoyadas sobre una base arenosa que éste presenta y que podría llevar a una errónea interpretación. Seguidamente, punto por punto, aclara el fenómeno. Dice: "la superficie primitiva del suelo ha heredado las asperezas graníticas más o menos fisuradas y en general adheridas a la masa inferior. Solamente la acción continuada, ejercida por los agentes atmosféricos sobre la superficie de estas rocas ha producido el cambio que existe hoy día. En efecto, está en la naturaleza de este fenómeno, atacar principalmente las aristas vivas, los puntos más salientes y naturalmente también las partes que por composición mineralógica presentan menos resistencia. Resulta que allí la desagregación debe haber tenido lugar en capas concéntricas, primeramente paralelas a la superficie primitiva, y que, perdiendo poco a poco las formas angulosas, tienden constantemente a resultar paralelas a la superficie de los núcleos de mayor resistencia". Por tanto interpreta el berrocal fruto de una disyunción esferoidal o en bolos de la masa granítica afectada por meteorización en sus zonas más vulnerables. La argumentación está apoyada con una magnífica secuencia de dibujos (Fig. 1). A esta interpretación añade la ingeniosa relación entre granitos de similar composición a partir de su grado deterioro como elemento útil para poder establecer el orden cronológico de la aparición de estas masas en la superficie del globo.

La cuarcita, es la roca más importante del relieve regional, pues todas forman la cima de montañas que destacan sobre una altiplanicie. Su percepción es que es difícil defender la idea de que cada una de ellas ha sido formada por un centro particular de levantamiento que no ha ejercido ninguna acción sobre el resto del *plateau*. Su contundencia contrasta con algunas interpretaciones un siglo más modernas involucrando el resalte a la tectónica su elevación. Sostiene que la formación de las cadenas y la nivelación del *plateau*, son posteriores a la deformación que afecta a los estratos por lo que con ello ordena cronológicamente plegamiento y elaboración del relieve. Concluye que éste es debido a una corrosión de la superficie primitiva del suelo que afecta más a unas rocas que otras, es decir alude al concepto que hoy llamamos erosión diferencial. Queremos destacar que Le Play ya interpreta que la elevación de las cuarcitas está en relación con el rebajamiento de las otras rocas circundantes.

EL MAPA

Aunque se trata de un mapa geológico, éste contiene elementos geomorfológicos como la propia topografía sombreada pues define en sí misma el relieve, específicamente, los inselbergs lineales o aislados, las alineaciones paralelas del Macizo de las Villuercas y las gargantas del Guadiana y Tajo. También están representadas las plataformas sobre el Terciario de la cuenca del Guadiana correspondientes a la Tierra de Barros, las rañas de Deleitosa y terrazas en el río Tajo. Es muy reseñable como expresa el límite de la Meseta con el Guadalquivir.

CONCLUSIONES

Le Play realiza la descripción de un territorio muy extenso. Señala y describe hasta al menor detalle todos los elementos que constituyen el relieve extremeño, y no solo se limita a ello sino que en la mayoría de los casos los interpreta con precisión y extraordinaria lucidez, en ocasiones contraviniendo algunos de los postulados paradigmáticos por esas fechas.

- Se refiere a multitud de elementos como *plateaux* o altiplanicies desarrolladas sobre esquistos o grauvacas donde señala el

carácter de superficie de erosión del mismo y a partir de ella definiendo sin saberlo el concepto de penillanura acuñado más de medio siglo después por Davis.

- Indica la existencia de trazados fluviales problemáticos o anómalos como el del Tajo para entrar en Extremadura. Se refiere también al encajamiento, de ese río y otros tributarios sobre el plateau con lo que está indicando el *rejuvenecimiento* de la penillanura extremeña.
- En casi todos los lugares hace alusión al papel de la *erosión diferencial* sobre el sustrato antiguo entre granitos, esquistos y grauvacas, y cuarcitas.
- Se fija en la isoaltitud de la línea de cumbres de las sierras. Recalca que, en contraposición a los rasgos propios del *plateau*, están las cadenas aisladas con lo que está definiendo ya el carácter de *penillanura* de Extremadura con las cadenas montañosas que sobre ella aparecen como inselbergs asociados, la mayor parte absolutamente rectilíneos (inselbergs lineales).
- Define los **portillos** o pasos tan frecuentes en la región extremeña cuya extremada proximidad da lugar a que se formen *relieves aislados* con forma de pirámide cuadrangular;
- Sienta las bases del carácter apalachiano del relieve de Sierra Morena, definiendo su línea de cumbres aplanada, es decir una superficie de cumbres constituida por una superficie de erosión antigua.
- Habla del carácter erosivo de la cadena, y además tiene la lucidez de correlacionarla con la de las cumbres de las cadenas aisladas de Extremadura. También indica abombamiento/flexión con el que hoy día se relaciona Sierra Morena e intuye, aunque no detecta, el accidente alpino que de E a O divide Extremadura.
- Define el dibujo geológico del relieve, en general de toda Extremadura, específicamente de la región de Almadén y de las Villuercas, donde traza las líneas maestras de lo que más tarde se ha venido a definir como el relieve apalachiano de ese macizo.
- En este exhaustivo recorrido por la geografía extremeña también deja una alusión a las pedrizas o pedreras, al referirse a las vertientes de las sierras formadas por rocas esquistosas recubiertas por una prodigiosa cantidad de bloques procedentes de la desagregación de las cimas de la cadena.
- Mas brevemente habla de la cuenca de Guadiana, hidrográfica y en sentido geológico, de sedimentación. Curiosamente, aunque describe esa cuenca y también la del Guadalquivir, no se extiende demasiado en referirse a aspectos geomorfológicos, tan solo señala la llanura de inundación o terrazas más modernas que llama plaines, o hace una brevísima referencia a la Raña, obviamente sin denominarla así.
- Señala con precisión la definición septentrional del Guadalquivir que constituye el borde del *plateau*.

El texto anterior enumera la ingente relación de elementos y términos de carácter geomorfológico que utiliza. El que sigue a continuación destaca tres interpretaciones o reflexiones de una lucidez extraordinaria para la época en que las realizó:

- La génesis por erosión diferencial de las cadenas montañosas aisladas de Extremadura y no por deformación tectónica directa.
- La interpretación del berrocal del granito de Malpartida por erosión esferoidal.

Para finalizar, queremos señalar que Le Play en ningún lugar de su escrito incluye una relación seleccionada de la ingente cantidad de observaciones que realiza. Muchas de ellas son, sin dudarlo, ideas adelantadas a su tiempo y precursoras de muchos conceptos y términos geomorfológicos. La razón de ello estriba en que el propio autor no era consciente de ello.

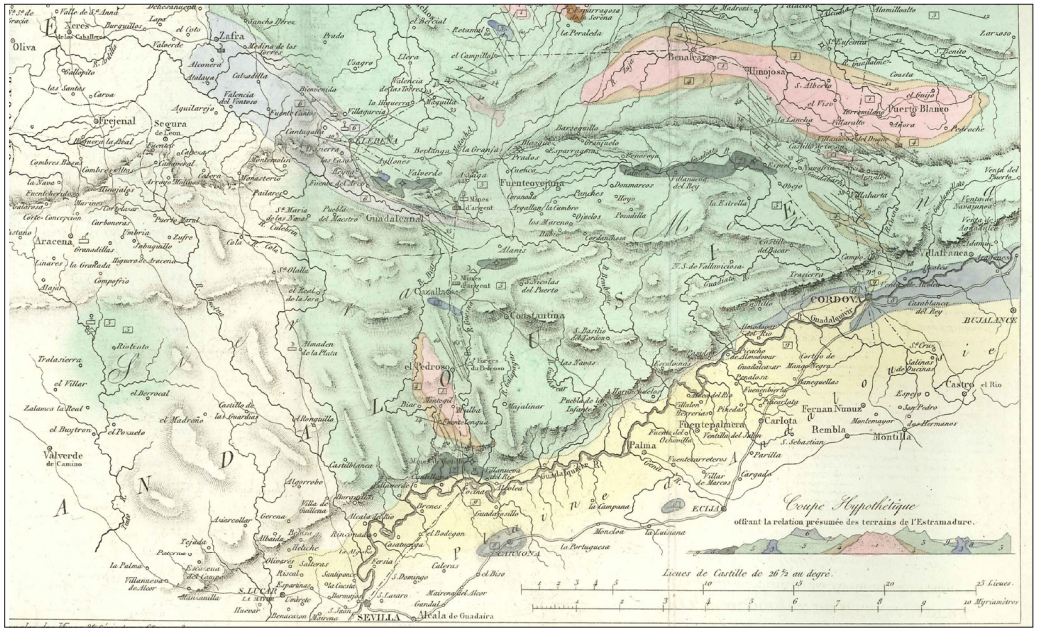


FIGURA 1 : *Fragmento del mapa geológico de Extremadura y norte de Andalucía de Frédéric le Play (1834)*

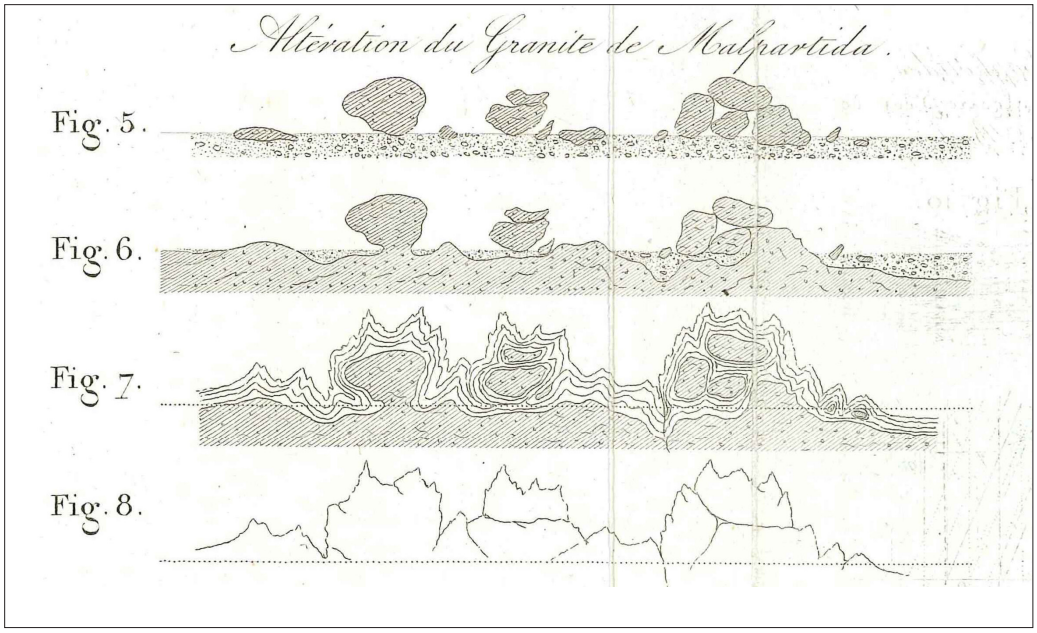


FIGURA 2. *Esquema de alteración de los granitos en Malpartida de Cáceres. F. Le Play (1834): "Essai pour servir au tracé d'une carte geologique de l'Estramadure et de plusieurs Districts des provinces limitrophes". Biblioteca IGME*

REFERENCIAS

Boixereu Vila E. 2016 *Evolución histórica de la cartografía geológica en España: Desde sus orígenes hasta los mapas de Verneuil y Collomb (1864) y Maestre (1864)*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 481 pág.

Le Play, M. F. 1834. Itineraire d'un voyage en Espagne, précédé d'un aperçu sur l'etat actuel et sur l'avenir de l'industrie minérale dans ce pays. *Annales des Mines*, 3ª serie 5, 175- 236.

Le Play, M. F. 1834 (b). Observations sur l'Extremadure et le nord d'Andalousie, et essai d'une carte geologique de cette contrée. *Annales des Mines*, 3ª serie 6, 297-380 y 477-519.

La meteorización de los granitoides de Les Guilleries y su tratamiento en el mapa geológico de los procesos activos y recientes y de la actividad antrópica de Cataluña a escala 1:25 000 (mapa geoantrópico)

Mapping granite weathering in the geological map of active and recent processes and anthropogenic activity of Catalonia at 1:25.000 scale (geoAntropic map). An example from the Guilleries granitic massif

M. J. Micheo[1], L. Culí[2], R. Carles[3], E.Pi[4], J.Picart[5], J. Cirés[6] y I. Herms[7]

[1] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Parc de Montjuic, E-08038 Barcelona. fus.micheo@icgc.cat
[2] Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitária, 04510. México DF, México. lculi@geologia.unam.mx
[3] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Parc de Montjuic, E-08038 Barcelona. rosa.carles@icgc.cat
[4] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Parc de Montjuic, E-08038 Barcelona. eulalia.pi@icgc.cat
[5] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Parc de Montjuic, E-08038 Barcelona. joan.picart@icgc.cat
[6] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Parc de Montjuic, E-08038 Barcelona. jordi.cires@icgc.cat
[7] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Parc de Montjuic, E-08038 Barcelona. ignasi.herms@icgc.cat

Resumen: El macizo de les Guilleries, situado en el extremo noreste de la Cordillera Prelitoral, en la provincia de Girona, está constituido mayoritariamente por rocas graníticas de edad paleozoica, que raramente se presentan inalteradas. Los diferentes grados de meteorización de estas rocas se representan en el mapa geoantrópico de Cataluña como un proceso reciente que afecta de forma generalizada a todo el macizo. El proceso de meteorización se muestra en el mapa geoantrópico como un proceso no funcional, ya que las potencias observadas son propias de un clima tropical húmedo, diferente del actual. El material que constituye los mantos de alteración es el '*sauló',* término usado comúnmente en las Cordilleras Costeras Catalanas para designar el *grus* o lehm granítico. En el mapa geoantrópico se definen tres grados de meteorización, basados en la escala de la *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1981). Se diferencia entre rocas ligeramente meteorizadas (equivalente a los grados I y II del ISRM), rocas moderadamente meteorizadas (equivalente al grado III y IV del ISRM) y rocas completamente meteorizadas (equivalente al grado V y VI del ISRM). Para abordar la meteorización de los granitoides en el macizo de les Guilleries, se establecieron unas áreas de trabajo correspondientes a las hojas a escala 1:25 000 de Viladrau, Sant Julià de Vilatorta y Sant Hilari Sacalm, con una extensión total de 383 km^2. La cartografía de grados de alteración se ha elaborado a partir de la consecución de cuatro fases: (1) Trabajo de campo con la toma de datos de alteración del manto granítico en 8.583 puntos de observación, (2) Análisis exploratorio de los datos obtenidos; (3) Estudio de los modelos de interpolación y (4) Implementación de resultados en el mapa geoantrópico.

Palabras clave: Guilleries, granitoides, interpolación, mapa geoantrópico, meteorización.

Abstract: *The Guilleries massif, located in the northern part of the Catalan Coastal Ranges, in the Girona province, is mostly made of several types of Paleozoic granitic rocks, which often oc-*

cur from moderate to strongly weathered. Different weathering grades of these rocks have been mapped at 1:25.000 scale in the Geoanthropic Map. In these map series, weathering is shown as a non-functional process, because granitic saprolites developed in a past humid tropical climate, different from today. The material which constitutes the weathering mantles is the 'sauló', a term commonly used in Catalonia to design the grus saprolites. Based on the scale of the International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1981) three grades of weathering are defined in the Geoanthropic Map: slightly weathered rocks (equivalent to grades I and II of ISRM), moderately weathered rocks (equivalent to grade III and IV of ISRM) and completely weathered rocks (equivalent to grade V and VI of the ISRM).Mapping grades of weathering has been made in four steps: (1) Field work with weathering data collection of granitic mantle in 8.583 observation points, (2) Exploratory analysis of obtained data, (3) Study of interpolation models and (4) results implementation in Geoanthropic Map.

Key words: *guilleries, granitoids, intepolation, geoanthropic map, weathering.*

INTRODUCCIÓN

El mapa geológico de los procesos activos y recientes y de la actividad antrópica 1:25 000 (geoantrópico) elaborado por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC), es un documento cartográfico de contenido geotemático aplicado en el que se representa, el estado actual de la constitución física del territorio, resultante de la acción antrópica sobre el medio geológico y los condicionantes geológicos para la actividad humana. El mapa geoantrópico incluye elementos propios de un mapa geomorfológico, al mismo tiempo que, realiza un inventario de los procesos geológicos naturales y de las intervenciones artificiales en el medio geológico. Clasifica los procesos naturales en función de su actividad y su génesis y los ordena según las áreas de generación de los materiales involucrados, los mecanismos de transporte, las áreas de deposición y las características y propiedades geológicas de los depósitos. De igual manera, clasifica los elementos y los depósitos artificiales en función de las actividades que los han generado.

En los mapas geológicos de rocas ígneas, el objetivo principal es mostrar las características petrológicas de los distintos tipos de rocas que afloran en superficie, sin entrar en la mayoría de los casos en el estudio de la determinación del grado de meteorización de la roca de las zonas aflorantes. Para la elaboración del mapa Geoantrópico en zonas con rocas ígneas, se ha implementado la ejecución de campañas de campo de recogida de datos con el objeto de caracterizar los distintos grados de alteración de las rocas aflorantes.

AMBITO DEL ESTUDIO Y CONTEXTO GEOLÓGICO

Este trabajo expone la metodología y los resultados obtenidos de la elaboración de la cartografía de mantos de alteración en el ámbito geográfico del macizo de las Guillerías (Girona).

Las rocas ígneas objeto de estudio forman parte de los grandes batolitos emplazados a finales de la orogenia Varisca, aproximadamente desde el Pensilvaniense al Pérmico. En Cataluña, estas rocas afloran en los Pirineos y en las Cordilleras Costero Catalanas. El área de trabajo se centra en el batolito del Mont-

seny-Guilleries, constituido por diferentes tipos de rocas plutónicas e hipoabisales relacionadas genéticamente (Fig. 1). Las rocas plutónicas están intruídas por multitud de rocas hipoabisales que forman parte del mismo episodio magmático (Soler *et al*., 2011; Durán, 1985; Viladevall, 1978; Culí, 2013a y 2013b).

La edad y la génesis de los mantos de alteración están relacionadas, en su mayor parte, a períodos cálidos del Neógeno y del Cuaternario.

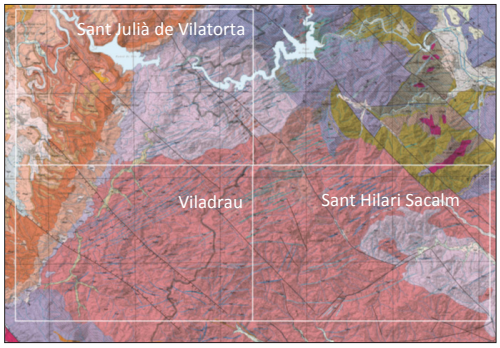


FIGURA 1. *Mapa de la cartografía geológica de la zona de estudio, con el límite de las tres hojas a escala 1:25.000 objeto de estudio*

METODOLOGÍA

- Los trabajos se realizaron a lo largo de tres años (2012, 2013 y 2014) y se distribuyeron en cuatro fases:

Fase 01. Captura de datos de campo. En las observaciones se han utilizado los valores de referencia establecidos en la escala de la *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1981) que distingue seis grados de meteorización (Fig. 2). Se realizaron un total de 8.583 observaciones de campo (Fig. 3) entre las hojas 1.25 000 de Sant Julià de Vilatorta, Viladrau y Sant Hilari de Sacalm, de los cuales un total de 2.817 observaciones corresponden a la hoja de Viladrau.

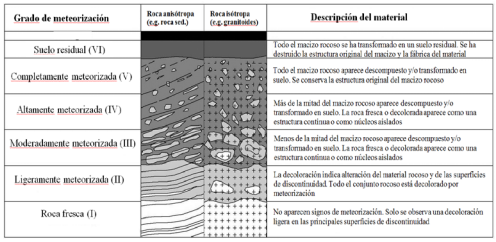


FIGURA 2. *Descripción del grado de meteorización de la roca según la ISRM (1981)*

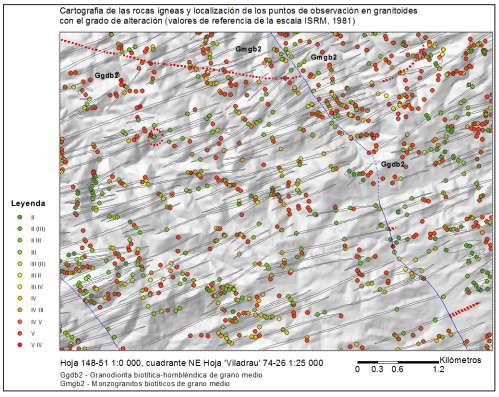


FIGURA 3. *Cuadrante NE de la hoja 1:25 000 de Viladrau. Se observa la localización de los puntos*

- **Fase 02: Análisis exploratorio de datos y depuración:** El trabajo ha consistido en realizar un estudio de la distribución de datos, determinar los estadísticos básicos, analizar la autocorrelación de los datos y calcular el semivariograma experimental.
- **Fase 03: Evaluación de los modelos de interpolación de datos y resultados. Elección del modelo de interpolación espacial final.** Se han aplicado técnicas determinísticas (método IDW *Inverse Distance Weighting*) y geoestadítsica (kriging simple) de regionalización de los datos. En la Fig. 4, se presenta el modelo obtenido con el método IDW en el cuadrante NE de la hoja de Viladrau.

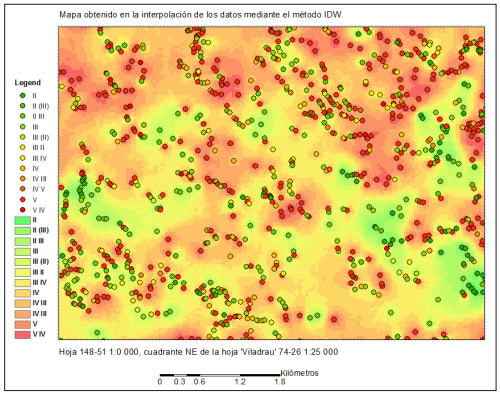


FIGURA 4. *Cuadrante NE de la hoja 1:25 000 de Viladrau. Modelo de interpolación de datos obtenido mediante IDW*

Los resultados obtenidos se evalúan mediante la aplicación de métodos de validación cruzada (*cross-validation*), y se estima el error cuadrático medio de los modelos obtenidos (RMSE).

- **Fase 04. Implementación de resultados de la interpolación al mapa geoantrópico.** A partir de los valores obtenidos con la interpolación, se ha efectuado un análisis de los resultados que ha finalizado con la delimitación de los contornos de separación de las diferentes y principales áreas de meteorización. Para expresar los resultados, los valores de meteorización obtenidos del trabajo de campo (1 – 7) se correlacionan con las tres clases establecidas en el mapa geoantrópico: ligeramente meteorizado moderadamente meteorizado y completamente meteorizado (Fig. 5).

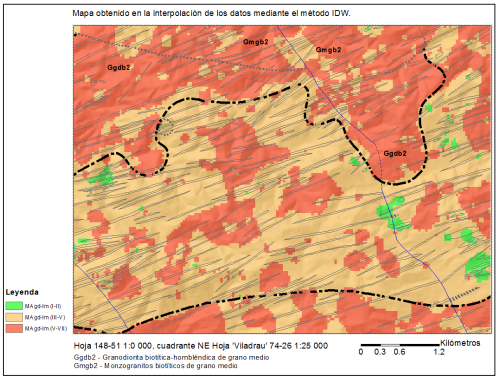


FIGURA 5. *Interpolación de los datos depurados con los tres rangos de expresión del mapa Geaontrópico para la hoja de Viladrau (74-26, 332-2-2). Las líneas negras gruesas corresponden a los límites de las zonas con diferentes grados de meteorización. Ejemplo de la hoja de Viladrau (74-26, 332-2-2)*

RESULTADOS

En el mapa Geoantrópico, los mantos de alteración se representan en el mapa principal y se clasifican según el grado de meteorización de la roca ígnea a la que afectan (Fig. 6).

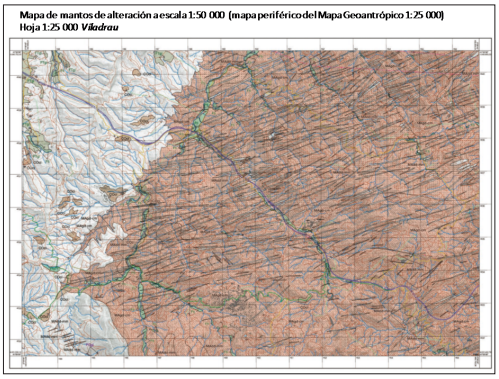


FIGURA 6. *Mapa periférico del mapa geoantrópico de Catalunya a escala 1:50 000 de la hoja de Viladrau (74-26, 332-2-2) donde se representan los diferentes grados de alteración de las rocas graníticas*

APLICACIONES DE LA CARTOGRAFIA DE MANTOS DE ALTERACIÓN

La cartografía de los mantos de alteración ofrece aplicaciones en el campo de la hidrogeología, ya que establece una relación directa con la presencia de acuíferos superficiales. También es útil en la *planificación* territorial y en la ejecución de infraestructuras, debido a que las propiedades geomecánicas del "*saulo* o *grus"* difieren en gran medida de las de la roca granítica original (Aristizábal, *et al.* 2011; Gonzalez, 2002). Además, el estudio de los mantos de alteración de rocas graníticas puede aportar datos sobre cómo reducir la cantidad de gases invernadero en la atmósfera, ya que en su formación han actuado como sumideros naturales de CO_2.



FIGURA 7. *Imágenes de dos afloramientos de les Guilleries, donde se observan los diques de leucogranitos aplíticos de grano fino inalterados, mientras que la gran masa de granodiorita biotítica hornbléndica se observa completamente meteorizada*

REFERENCIAS

Aristizábal, E., Valencia, Y., Guerra, A., Vélez, M., y Echeverri, O. 2011. Caracterización geotécnica de perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ígneas en ambientes tropicales. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, Número 30, 93-106.

Culí, L. 2013a. *Cartografia dels granitoides i dels metasediments paleozoics dels fulls a escala 1:25.000 de Sant Julià de Vilatorta (74-25, 332-2-1) i Viladrau (74-26, 332-2-2).* Informe inédito. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), 122 p.

Culí, L. 2013b. *Treballs de cartografia geológica dels granitoides i dels metasediments paleozoics del full a escala 1:25.000 de Sant Hilari Sacalm (75-26, 333-1-2).* Informe inédito. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), 65 p.

Durán, H. 1985. *El Paleozoico de les Guilleries*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona, 1-24.

Gonzalez, L. 2002. Meteorización de los materiales rocosos. En: Ingeniería Geológica, 134-139.

Soler, D., Pallí, Ll. y Brusi, D. 2013. *Geologia de les Guilleries i el Collsacabra: 4 itineraris pel sector gironí*. Universitat de Girona, Geodinàmica externa, 148 p.

Viladevall, M. 1978. *Estudio petrológico y estructural de las rocas metamórficas y graníticas del sector nord-oriental del macizo del Montseny-Guilleries*. Resumen Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, 1-12.

La cartografía regional de peligrosidad de inundación por criterios geomorfológicos en el Plan de Acción Territorial frente al Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA)

Flood hazard regional mapping through geomorphological criteria in the Territorial Action Plan for Flood Risk Prevention in the Valencia Region (PATRICOVA)

C. SanchisIbor[1], J.M. Ruiz Pérez[2], J.S. Palencia Jiménez[3] y F. Francés[4]

[1] Centro Valenciano de Estudios del Riego, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 Valencia (Valencia), csanchis@hma.upv.es
[2] Jose.M.Ruiz-Perez@uv.es
[3] Departamento de Urbanismo, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 Valencia (Valencia), jpalenci@urb.upv.es
[4] Instituto de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 Valencia (Valencia), ffrances@hma.upv.es.

Resumen: La puesta en marcha del Plan de Acción Territorial frente al Riesgo de Inundación de la Comunitat Valenciana (PATRICOVA) en el año 1996 fue una medida pionera en el ámbito de la prevención de inundaciones en nuestro país. El Plan, junto con diversas medidas e infraestructuras, desarrollaba una cartografía a escala 1: 50.000 que identificaba las zonas de la Comunitat Valenciana con peligrosidad de inundación y distinguía seis niveles diferentes en función de la recurrencia y calado de las inundaciones. El desarrollo de las técnicas y recursos cartográficos asociados a los SIG y la aparición de normativas estatales y europeas sobre la materia hicieron posible y necesaria una revisión dela cartografía del plan, parcialmente actualizado en 2002. En el año 2009 la Generalitat Valenciana impulsó nuevos trabajos de actualización del PATRICOVA. Como resultado de estos trabajos, la cartografía y la normativa del PATRICOVA ha incorporado un nuevo nivel de peligrosidad, la peligrosidad 7 o peligrosidad por criterios geomorfológicos. Esta cartografía, elaborada a escala 1:10.000, distingue diferentes unidades geomorfológicas en función de las tipologías de inundación asociadas a éstas, las cuales deben ser consideradas por las futuras actuaciones urbanísticas. La presente comunicación describe el proceso de elaboración de la cartografía de peligrosidad por criterios geomorfológicos, detallando los aspectos metodológicos elaborados y aplicados para su desarrollo, los materiales empleados, las dificultades observadas y las ventajas obtenidas, tanto en los términos prácticos derivados de su aplicación, como en relación al reconocimiento del método geomorfológico como parte esencial de las metodologías del prevención del riesgo de inundación.

Palabras clave: cartografía, geomorfología, inundaciones, peligrosidad, planeamiento urbanístico.

Abstract: The *Territorial Action Plan for Flood Risk Prevention in the Valencia Region (PATRICOVA), launched in 1996, was a pioneer measure for hazard prevention in Spain. This plan, developed at scale 1: 50.000, distinguished six different hazard levels directly related to the recurrence and depth of flood events. The subsequent development of GIS techniques and cartographic sources, and the publication of new Spanish and European legislation made possible and required a revision of this maps, partially updated in 2002. In 2009, the Valencian Regional Government promoted several works to review and update this Plan. As result of these works, the new version of PATRICOVA maps and regulations introduced a new level of hazard: Hazard 7 or Hazard due to geomorphological criteria. These level or layer, developed at scale 1:10.000, identified various geomorphological units according to the flood typologies related to them, which should be considered for future urban planning. This paper aims at describing the process of development of this hazard mapping under geomorphological criteria, considering methodological aspects, materials used, observed difficulties and advantages found. This concerns the direct outputs derived from PATRICOVA development, and the acknowledgement achieved of the geomorphological methodologies as an essential part of the flood prevention techniques.*

Key words: *Floods, geomorphology, hazard, mapping, urban planning.*

INTRODUCCIÓN

La puesta en marcha en 1996 del Plan de Acción Territorial frente al Riesgo de Inundación de la Comunitat Valenciana (PATRICOVA) fue una actuación pionera en el ámbito de la prevención de inundaciones en nuestro país. El Plan, junto con diversas medidas e infraestructuras, desarrollaba una cartografía a escala 1: 50.000 que identificaba las zonas de la región con peligrosidad de inundación. El PATRICOVA distinguía, mediante criterios hidrológico-hidráulicos, seis niveles diferentes en función de la recurrencia y calado de las inundaciones. La cartografía del plan fue parcialmente actualizada en 2002 y su desarrollo normativo se aprobó en 2003.

El desarrollo de las técnicas y recursos cartográficos asociados a los SIG y la aparición de normativas estatales y europeas (Directiva 2007/60/CE, RD 903/2010) sobre la materia hicieron posible y necesaria una nueva revisión del plan. En consecuencia, en el año 2009 la Generalitat Valenciana puso en marcha nuevos trabajos de actualización. Estos, desarrollados en los años inmediatamente posteriores, concluyeron en 2013, pese a lo cual, la revisión del citado plan no ha sido definitivamente aprobada hasta el pasado octubre de 2015. En esta última revisión del PATRICOVA se ha actualizado la cartografía de los seis niveles de peligrosidad y se ha incorporado un nuevo nivel: la peligrosidad 7 o peligrosidad por criterios geomorfológicos.

La incorporación de un nivel de peligrosidad asociado a criterios geomorfológicos responde al creciente reconocimiento de los métodos de esta disciplina como elemento clave para la caracterización de las zonas inundables y para el calibrado de los modelos hidrológico-hidráulicos. Una extensa bibliografía documenta estos métodos, tanto a escala estatal (Ayala, 1985; Ollero, 1996; Peña Monné, 1997; Díez-Herrero *et al*., 2008; Sánchez y Lastra, 2011; Fernández, 2015), como en el ámbito valenciano (Rosselló, 1983; Segura, 2003; Carmona, 1995; Carmona y Segura 1999; Carmona y Ruiz, 2000; Mateu, 2002; Ruiz y Carmona, 2004).

Asimismo, la necesidad de incorporar la perspectiva geomorfológica a los trabajos de prevención del riesgo de inundaciones ha devenido en los últimos años en un requerimiento normativo. Así se establece en el propio PATRICOVA y en otras normativas como la de la Región de Murcia (Francés *et al*., 2006) o en las Directrices de Ordenación Territorial de Segovia y su Entorno (Santos *et al*., 2006). Además, el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables ha incorporado con sumo detalle estas metodologías (Sánchez y Lastra, 2011).

PLANTEAMIENTO, FUENTES Y ESCALAS

El objetivo principal del trabajo era la revisión de los actuales niveles de peligrosidad de PATRICOVA y la creación de un nuevo nivel o niveles asociados a la peligrosidad por criterios geomorfológicos. El procedimiento general se resume en la Figura 1.

El primer paso para definir estos nuevos niveles de peligrosidad, y el más costoso, fue la elaboración de un mapa de peligrosidad de inundación según criterios geomorfológicos (MPICG), en el que se distinguieron diversas unidades morfológicas asociadas a diferentes procesos de inundación. Se trataba de confeccionar una cartografía geomorfológica de tipo fisiográfico-sintética, que representara unidades geomorfológicas homogéneas mediante formas cerradas (polígonos), la más adecuada en mapas de peligrosidad (Martín Duque, 2000) por su utilidad para la toma de decisiones a nivel administrativo. Pero para su elaboración, en cuanto a la identificación y delimitación de las unidades, se empleó un elevado volumen de mapas morfogenéticos. Por ello, en puridad, debe considerarse un mapa sintético de unidades geomorfológicas, como proponen Martín-Serrano *et al*. (2004) y Díez-Herrero *et al*. (2008).

Para la identificación y delimitación de las unidades geomorfológicas se emplearon diversas fuentes de información, tomando como base una exhaustiva recopilación de los trabajos de investigación desarrollados durante las últimas décadas. Además, se empleó una versión digitalizada (buena parte de la cual fue georreferenciada) del vuelo americano de 1956 (Servicio Geográfico del Ejército) y la ortofotografía de 2006 del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV). También se contó con el modelo digital de datos LiDAR de 2009 (PNOA, CNIG) y con un mapa de sombras generado a partir de este *input* por el ICV. En muchos casos, los trabajos se completaron con visitas de campo y puntualmente con informaciones sobre inundaciones históricas, dada la interacción existente entre estos métodos y los geomorfológicos.

En función del tamaño de las unidades, la digitalización se efectuó en escalas entre 1: 2.000 y 1:10.000 sobre las citadas ortofotografías y mediante el *software* ArcGis 9.2 (ESRI, Redlands, California, 2006). Pese a que la escala menor utilizada fue 1:10.000, posteriormente la administración decidiría limitar la visualización de la capa resultante hasta la escala 1:25.000.

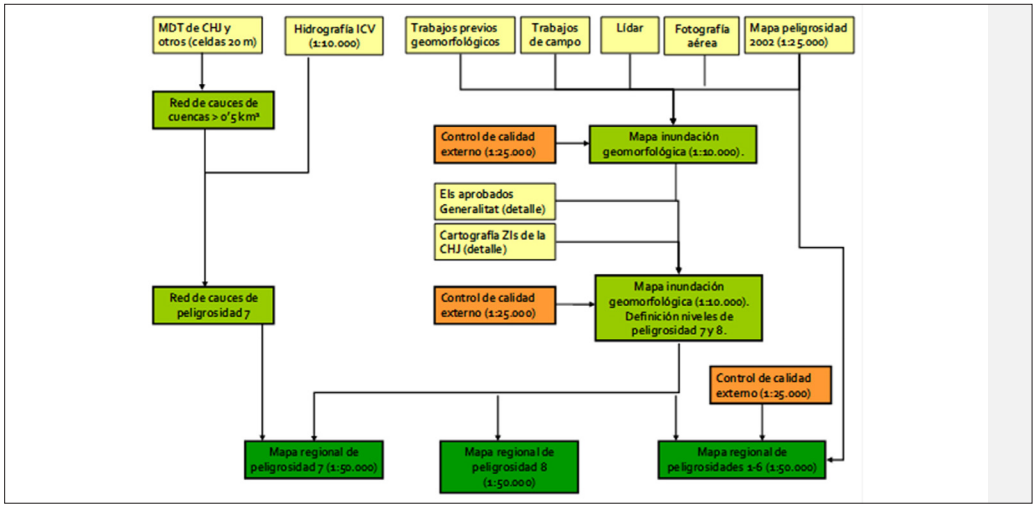


FIGURA 1. *Esquema del procedimiento desarrollado en la actualización del PATRICOVA*

UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

El MPICG clasificó distintos ambientes geomorfológicos con la finalidad de aportar información detallada sobre la variedad de situaciones de peligrosidad de inundación que pueden tener lugar en el territorio valenciano. Se trataba en definitiva, de caracterizar las formas fluviales cartografiadas para poder resaltar los tipos de procesos de inundación asociados, mediante la siguiente clasificación simplificada de unidades geomorfológicas:

Cauces principales. Lechos mayores de los cursos fluviales principales, entre los que se consideraron tanto el canal de aguas bajas, como las barras laterales, *point-bars*, meandros estrangulados y terrazas bajas. Se vincularon a los procesos de inundación en topografía encajada entre terrazas y laderas.

Barrancos y vaguadas de fondo plano. Esta amplia categoría englobó diversas tipologías de cauces entre las que se incluyeron cauces simples de primer o segundo orden y otros de mayor rango que no presentan encajamiento significativo, incluso algunas vaguadas que drenan *glacis*, piedemontes y fondos de valle en ambientes semiáridos. Entre estas tipologías cobran especial relevancia las vaguadas de fondo plano, particularmente presentes en zonas meridionales de la Comunitat Valenciana sobre litologías blandas. Estas conforman importantes redes de drenaje cuya peligrosidad pasa con frecuencia desapercibida debido a su transformación por cultivos abancalados. En estas formas se dan diferentes procesos de inundación lineal, desde arroyadas laminares, hasta flujos concentrados con velocidades elevadas en algunos barrancos de zonas de cabecera.

Llanura aluvial o llanuras de inundación. Edificios aluviales extensos, con topografías por lo general convexas o con puntuales alternancias cóncavo-convexas, con una importante variedad morfológica debido a los procesos de acreción plurisecular y a la divagación de los cauces. Se asocian por lo general a procesos de inundación en manto, extensiva y de duración relativamente larga. Los flujos son generalmente de circulación lenta y presentan con frecuencia flujos secundarios de re-

torno al cauce. La variedad morfosedimentaria de estos ambientes de amplia extensión hizo que puntualmente se distinguieran algunos subambientes:

– *Crestas aluviales*: motas, diques o *levées*, que coronan las topografías convexas, donde se producen diversos procesos de desbordamiento, se reduce el periodo de permanencia de las aguas y se pueden formar bruscamente importantes depósitos sedimentarios (subdeltas de derrame o *crevasse splays*).
– *Paleocauces*: cursos abandonados por procesos de avulsión, que suelen reactivarse en los eventos de mayor magnitud, concentrando y vehiculando los flujos de crecida.

Abanicos aluviales. Edificios aluviales radiales, siempre convexos, cuyo ápice se sitúa en contacto entre los relieves y fosas interiores o llanos litorales, asociados a pérdida de pendiente y liberación de constreñimiento topográfico. El modelo de Segura (2003) explica con detalle el comportamiento de estos sistemas en el ámbito valenciano. Los desbordamientos tienen por lo general un flujo lineal, con importantes velocidades que suele concentrarse en paleocauces y derrames asociados a puntos de ruptura en los sectores apicales o medios. En la zona distal y en el contacto con otras unidades la velocidad del flujo disminuye y la inundación se hace más extensa. La permanencia de la inundación es corta, singularmente en las zonas apicales y medias. Son frecuentes los procesos de erosión remontante y de reorganización de flujos, estos últimos singularmente donde hay una secuencia de abanicos o fenómenos de coalescencia lateral. Esto nos lleva a distinguir algunas subunidades también en este caso, entre las que se incluyen de nuevo los *paleocauces* y se destacan las *depresiones inter-conos*, es decir, aquellos espacios entre abanicos próximos o coalescentes que reorganizan y vehiculan los flujos derramados por la superficie convexa de otros conos, generando situaciones de peligrosidad a veces difícilmente perceptibles.

Abanicos torrenciales. Morfología similar a los abanicos aluviales, en este caso asociados a cuencas de pequeña entidad y cuerpos sedimentarios de mayor pendiente. Pueden ser individuales o coalescer alineados en el borde de una fosa. Se asocian a los mismos procesos que los abanicos aluviales, y además, en determinados casos, a flujos de derrubios.

***Glacis*.** Depósitos de piedemonte que forman extensas laderas de pendiente muy suave y perfil cóncavo, en ocasiones formados por la coalescencia de antiguos abanicos. Ocasionalmente presentan redes de drenaje internas mal organizadas y escasamente jerarquizadas. Se vinculan a arroyadas laminares de peligrosidad baja.

Derrames. Zonas asociadas a cauces en los que se produce la desaparición del canal por pérdida de pendiente y frecuentemente también por actuaciones antrópicas, debido a la puesta en cultivo de sus tierras. Raramente presentan depósitos sedimentarios reconocibles, debido a la escasez del aporte sedimentario y a su retirada o transformación por los agricultores. Son zonas en las que existe una escasa percepción del riesgo pero que pueden presentar localmente calados importantes.

Humedales. Láminas de agua intermitentes o fluctuantes en espacios naturales o cultivados. Incluyen una amplia variedad tipológica entre las que se han considerado endorreísmos y semiendorreismos de zonas interiores y marjales costeras. Se han incluido también lagunas y embalses, pese a su origen artificial, considerándose en este caso como límite la isohipsa impuesta por la cota de coronación de la presa. Se asocian a procesos de concentración de flujos y estancamientos de agua por lo general prolongados.

Dolinas y poljes. Depresiones cerradas de origen kárstico de dimensiones modestas en el primer caso, en torno al centenar de metros de diámetro, y kilométricas para el segundo. Si bien se trata de formas de disolución kárstica no consideradas parte de las morfologías fluviales, estas depresiones han sido también incorporadas al mapa, debido a su capacidad de concentración de flujos y a la prolongada permanencia de encharcamientos en algunos episodios lluviosos.

Restingas. Barreras costeras de arenas o cantos de origen marino y eólico, que aíslan albuferas y humedales. Constituyen también formas ajenas a las morfologías estrictamente fluviales, pero pueden ser objeto de procesos de inundación por los aportes de los desbordamientos de los cursos fluviales de mayores dimensiones, potenciados por el efecto tapón de los temporales marinos. En estas barreras, la presencia de depresiones o surcos interdunares facilita la apertura de vías de desagüe temporales al mar durante las crecidas o la dispersión de parte de los flujos desbordados.

REVISIÓN Y ASIGNACIÓN DE PELIGROSIDAD

Una vez editada una primera versión de esta cartografía a escala 1:25.000, fue sometida a un proceso de revisión y discusión por parte de los autores y de un equipo externo formado por expertos de la Universitat de València y la Universitat Politècnica de València (Figura 1). Seguidamente, se procedió a incorporar a esta primera versión la información procedente de los estudios de inundabilidad ya aprobados por la Generalitat Valenciana y de los efectuados por la Confederación Hidrográfica del Júcar. Con todo ello se efectuó una segunda revisión por parte de los autores y el equipo externo.

La asignación de peligrosidad es, como indican Diez-Herrero *et al.* (2008), el talón de Aquiles del método geomorfológico. En este caso, la existencia de seis niveles de peligrosidad vinculados a criterios hidrológico-hidráulicos facilitó esta tarea. La superficie coincidente entre la cartografía de niveles 1-6 y las unidades geomorfológicas del MPICG fue asignada a los citados niveles de peligrosidad 1-6. La intersección de estas capas generó la aparición de numerosos polígonos de pequeño tamaño (*slivers*) que fueron utilizados para revisar y corregir los límites de los niveles 1-6, originalmente digitalizados a escala 1:50.000.

El MPICG sirvió asimismo para plantear la introducción de modificaciones en los niveles de peligrosidad de la versión de PATRICOVA elaborada en 2002 a escala 1:25.000 (Francés, 2002). El análisis geomorfológico permitió efectuar algunos ajustes en las áreas inundables definidas por esta cartografía; se introdujeron nuevas zonas de peligrosidad 1-6 y se suprimieron algunas en las que las actuaciones recogidas por el propio PATRICOVA habían reducido considerablemente los niveles de riesgo. En definitiva, se empleó la información geomorfológica para obtener una mejor calidad en los niveles estimados a partir de métodos hidrológico-hidráulicos.

Las unidades geomorfológicas no coincidentes con las zonas de peligrosidad 1-6 fueron consideradas zonas de peligrosidad adicional y fueron reclasificadas con la intención de distinguir dos niveles. Dentro de la categoría de peligrosidad 7 se incluyeron la mayoría de las morfologías clasificadas y cartografiadas, ya que quedaban asociadas a la presencia constatada de flujos concentrados, a importantes alturas de inundación o a inundaciones prolongadas, y por tanto podían presentar localmente una mayor peligrosidad.

En el nivel de peligrosidad 7, además de las unidades definidas por el MPICG, se decidió la incorporación de todos aquellos cauces que cumplían cualquiera de las siguientes

condiciones: haber sido considerados por la cartografía oficial elaborada por el ICV a escala 1:10:000 o presentar un tamaño de cuenca vertiente superior a 0,5 km^2. Esta información se obtuvo mediante el tratamiento de un modelo digital de elevación, que permitió elaborar una red hidrográfica de cauces con tamaño de cuenca superior a 0,5 km^2. La red resultante fue sumada a una versión corregida de la cartografía del ICV mediante ArcGis 9.2, con objeto de definir una capa única, con una anchura de 50 m en cada entidad, que presentara todos los cauces valencianos que cumplieran al menos una de las citadas condiciones. La superficie cubierta finalmente por la peligrosidad 7 ocupa 1439 km^2 (6,2% de la superficie de la Comunitat Valenciana).

Como peligrosidad 8 se consideraron sólo dos ambientes morfosedimentarios. Por un lado, los *glacis*, donde sólo tienen lugar procesos de arroyada laminar. Por otra parte, y de un modo parcial, algunos grandes abanicos aluviales, generalmente de edad pleistocena, en los que los cauces fluviales discurren encajados sin riesgo de desbordamiento y donde tan sólo son habituales procesos de arroyada. También se incorporó a esta categoría cualquier otra morfología emplazada en zonas donde el desarrollo de obras de encauzamiento o defensa con niveles de protección estimados para eventos de recurrencia de 500 años hace improbable el desarrollo de procesos de inundación, y sólo subsiste un riesgo residual. Para este nivel 8 sólo se recomendó su consideración a título informativo, debido a que únicamente una alteración futura de las condiciones locales de drenaje podría generar procesos que de riesgo significativo.

DESARROLLO NORMATIVO

El PATRICOVA detalla una regulación que establece limitaciones a la implantación de diversos usos sobre los suelos afectados por los diferentes niveles de peligrosidad (DOCV, 2015). Es destacable la importancia que adquiere la peligrosidad geomorfológica al establecerse las mismas limitaciones en el suelo no urbanizable que para los niveles de peligrosidad 2 a 5, según el artículo 18 de la Normativa, por lo que sólo se permiten usos agrícolas y espacios deportivos abiertos. No obstante, dichas limitaciones por peligrosidad geomorfológica son preventivas, pudiéndose eximir de forma justificada la prohibición de alguno de los usos propuestos mediante estudios específicos que demuestren ante la administración autonómica la escasa incidencia del riesgo de inundación en relación con la actividad a implantar.

Asimismo, en el suelo urbanizable sin programa de actuación integrada aprobado afectado por cualquier nivel de peligrosidad, incluida la geomorfológica, se requerirá de un estudio de inundabilidad específico con carácter previo a su programación, según el artículo 19 de la Normativa. Además, conforme al artículo 14 de la Normativa del PATRICOVA, hace opcional la inclusión de la peligrosidad geomorfológica como Infraestructura Verde (definida en la Ley 5/2014 de la Generalitat Valenciana), una red interconectada de espacios, libres de edificación, conformada por los paisajes de mayor valor ambiental, cultural y visual que sustenta la estructura básica ecológica de la región.

CONCLUSIONES

El nuevo PATRICOVA es la primera normativa de rango y escala autonómicos que ha establecido una regulación normativa sobre limitaciones a los usos del suelo identificados por encontrarse afectados por un nivel de peligrosidad de inundación definido por criterios exclusivamente geomorfológicos. La aprobación de este plan, que permitirá mejorar la prevención de riesgos en la región, constituye un importante reconocimiento legal de la importancia de estas metodologías en la determinación de peligrosidad de inundación.

AGRADECIMIENTOS

A Juan B. Marco (IIAMA, Universitat Politècnica de València), Joan F. Mateu, Pilar Carmona y Francisca Segura (Departament de Geografia, Universitat de València) por su participación en el control de calidad externo. A Luis Juaristi y Vicent Domènech (Generalitat Valenciana) por su interés e implicación en el proyecto.

REFERENCIAS

Ayala, F.J. (coord.) 1985. *Geología y prevención de daños por inundaciones,* IGME, 421 pp.

Carmona, P. 1995. Análisis geomorfológico de abanicos aluviales y procesos de desbordamiento en el litoral de Valencia. *Cuadernos de Geografía,* 57, 17-34.

Carmona, P., Segura Beltrán, F. 1999. Las inundaciones en la plana de Gandía: formas y procesos, *Cuadernos de Geografía,* 65-66: 45-60.

Carmona, P. and Ruiz, J.M. 2000. Las inundaciones de los ríos Turia y Xúquer. En Camarasa A. y Mateu, J. (Coord.), *Las inundaciones en España en los últimos veinte años. Una perspectiva geográfica,* Serie Geográfica, 9, 49-69.

Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L. and Llorente-Isidro, M. 2008. *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración,* IGME, Madrid, 190 pp.

DOCV 2015. *Decreto 201/2015, de 29 de octubre, del Consell, por el que se aprueba el Plan de acción territorial sobre prevención del riesgo de inundación en la Comunitat Valenciana.* [2015/8835] (DOCV núm. 7649 de 03.11.2015)

Fernández, E. 2015. *Identificación de la peligrosidad de inundaciones con análisis geomorfológicos (Cornisa Cantábrica)*, Tesis doctoral, Universidad de Oviedo.

Francés, F. (dir.) 2002. *Adaptación a la escala 1:25.000 del mapa regional de riesgo de inundación*, IIAMA, Universidad Politécnica de Valencia.

Francés, F., Sanchis Ibor, C., Albentosa, E. and Eguíbar, M.A. 2006. *Directrices técnicas para la elaboración de estudios de inundabilidad en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia*, IIAMA, Universidad Politécnica de Valencia.

Martín Duque, J.F. 2000. La información geomorfológica en el contexto de los inventarios ambientales. Mapas fisiográficos para la gestión territorial, *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (SG)*, 96, 33-46.

Martín-Serrano, A., Salazar, A., Nozal, F. and Suárez, A. 2004. *Mapa geomorfológico de España. Escala 1:50.000. Guía para su elaboración*, IGME, Madrid, 128 pp.

Mateu, J.F. (Coord.) 2002. Zonas inundables de entorno de Castellón. Memoria y mapa. Inédito. P*lan de Acción Territorial de Castellón de la Plana*, Generalitat Valenciana.

Ollero, A. 1996. *El curso medio del Ebro: geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos*, Consejo de la Protección de la Naturaleza de Aragón, 311 pp.

Peña Monné, J.L. (ed.) 1997. *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*, Geoforma, Logroño, 227 pp.

Rosselló y Verger, V.M. (coord.) 1983. La riada del Júcar, *Cuadernos de Geografía*, 32-33.

Ruiz, J.M. and Carmona, P. 2004. Flujos y sedimentos de inundación (Octubre del 2000) en el entorno de la Albufera de Valencia. En: G. Benito & Díez Herrero (eds.) *Riesgos naturales y antrópicos en Geomorfología*, *Actas de la VIII Reunión Nacional de Geomorfología*, SEG y CSIC, Madrid, II, 59-67.

Sánchez Martínez, F.J. and Lastra, J. (coords.) 2011. *Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de*

zonas inundables, MARM, Madrid, 347 pp.

Segura Beltrán, F. 2003. Model d'inundacions en ventalls al.luvials: el cas de les planes costaneres valencianes, *Cuadernos de Geografía*, 73-74, 207-232.

Santos, L., Martín, J.F. and Díez-Herrero, A. 2006. Aspectos geomorfológicos de las directrices de ordenación territorial de Segovia y su entorno (DOTSE), *Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología*, pp. 945-961.

El delta del Ebro a través de la cartografía histórica y la fotografía aérea: evolución morfológica de la llanura deltaica (1858-2012)

The Ebro delta through historical cartography and aerial photography: morphological evolution in the delta plain and changes (1858-2012)

A. Valls, F. Segura[1] y B. Martínez-Clavel

[1] Dpto. de Geografía, Facultad de Geografía e Historia, Universitat de València, Blasco Ibáñez 28, 46010 Valencia (Valencia). Francisca.Segura@uv.es

Resumen: En este trabajo se pretende caracterizar de forma sistemática la evolución del delta a partir de un análisis diacrónico de tres fuentes de información: a) cartografía histórica, b) mapas topográficos y, c) fotografía aérea. Por lo que respecta a la cartografía histórica, se han seleccionado dos mapas bastante precisos y detallados: el mapa de Francisco Coello (1858) y las cartas náuticas de Rafael Pardo Figueroa (1887-1890). También, la publicación temprana del mapa topográfico nacional a escala 1:50.000 entre 1918-1920 y la publicación de 1940, ha permitido cartografiar con mayor fidelidad las formas y la superficie del delta. A partir de 1946, existen ortofotografías de diversos vuelos, que se han digitalizado. Por otra parte, con el programa DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) se han cuantificado los cambios en la línea de costa producidos entre finales del siglo XIX y la actualidad. A partir de toda esta información se ha podido caracterizar la evolución de la llanura deltaica y de las formas geomorfológicas más significativas que configuran el delta. Por lo que respecta a las formas, se ha analizado la evolución de: a) desembocadura, b) flechas y ganchos y, c) lóbulos. Los cambios en la línea de costa también han sido cartografiados y se han evaluado cuantitativamente. Durante este período se han producido cambios significativos en las flechas y los ganchos y en los lóbulos deltaicos, algunos de los cuales han desaparecido al dejar de ser funcional el cauce que los alimentaba. Por otra parte, el cauce principal se ha mantenido bastante estable.

Palabras clave: cauce, delta del Ebro, evolución, llanura deltaica.

Abstract: *This paper aims at characterizing in a systematic way the evolution of the delta, based on a diachronic analysis of three different sources of information: a) historical cartography, b) topographical maps and c) aerial photography. Regarding historical cartography, two quite precise and detailed maps have been selected: the map by Francisco Coello (1858) and the nautical charts by Rafael Pardo Figueroa (1887-1890). Also, the early publication of the national topographical map on a scale 1:50.000 between 1918-1920 and the publication of 1940 has allowed the creation of a more faithful cartography of the shape and surface of the delta. After 1946, there are different ortophotographies from different flights that have been digitized. On the other hand,*

the program DSAS (Digital Shoreline Analysis System) has been used to quantify the changes in the shoreline occurred between the end of the nineteenth century and the present. Based on all these sources of information we have been able to characterize the evolution of the riverbed and the most significant geomorphological forms that create the delta. Regarding these forms, we have analysed the evolution of: a) mouth, b) spits and c) the lobes. The cartography of the changes in the shoreline has also been created and these variations in the shoreline have been evaluated quantitatively. During this period there were significant changes in the spits and also in the deltaic lobes, some of which have disappeared after stopping being functional the channel that fed into them. On the other hand, the main channel has remained quite stable.

Key words: *delta plain, Ebro delta, evolution, riverbed.*

INTRODUCCIÓN

El río Ebro, con una cuenca de drenaje de 85.001 km^2, tiene una longitud de 910,5 km^2, de los cuales los últimos 30 discurren en el delta formado en su desembocadura (Dolz *et al*. 1997). Hay numerosas publicaciones que han abordado la evolución del delta del Ebro a través de la cartografía y de las fotografías aéreas. La evolución histórica se ha estudiado a partir numerosos documentos cartográficos (Maldonado, 1972; Canicio e Ibáñez, 1999) que muestran cómo un antiguo estuario, en 2000 años se ha transformado en un delta, con varias desembocaduras que han ido cambiando con el tiempo (Maldonado y Riba, 1971; Maldonado, 1972; Guillén y Palanques, 1997; Somoza *et al.*, 1998). En algunas de estas publicaciones, los últimos mapas históricos datan de finales del siglo XIX y las primeras fotografías aéreas de 1946, por lo que existe un salto temporal importante a la hora de cartografiar la evolución del delta en la primera parte del siglo XX.

En estos momentos, gracias a la labor de organismos como el Instituto Geográfico Nacional (IGN) o el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), están a disposición de los investigadores algunos documentos históricos poco conocidos que permiten analizar mejor este período de tiempo. Por otra parte, existen numerosos trabajos que realizan estudios geomorfológicos del delta que combinan la fotografía aérea con otras técnicas, pero suelen ser trabajos parciales, dada la dificultad que comportaba, hasta hace poco tiempo, la rectificación de las imágenes. En los últimos años, el ICC ha puesto en línea numerosos vuelos fotogramétricos ortorectificados, lo que permite reconstruir la evolución de todo el delta y cuantificar los cambios acaecidos con mayor precisión que antaño.

A tenor de lo expuesto anteriormente, los objetivos del presente trabajo son: a) analizar las características evolutivas del delta desde finales del s. XIX hasta 1940 a partir de la cartografía histórica; b) cuantificar la evolución del delta a partir de las ortofotos desde 1956 hasta la actualidad y c) analizar las tendencias de la línea de costa para el período de análisis.

ZONA DE ESTUDIO

El delta del Ebro cuenta con una extensión emergida aproximada de 320 km^2, que se está reduciendo en la actualidad, debido a la disminución de aportes hidrológicos y sedimentarios. Las formas más relevantes del delta son las flechas del Fangar y la Banya, que con sus ganchos finales, cierran de forma parcial las bahías del Fangar y Alfacs, respectivamente. Destacan además los *estanys* y numerosos paleocauces (Maldonado y Riba, 1971).

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada ha consistido en realizar un análisis diacrónico de tres tipos de materiales: a) cartografía histórica, b) mapas topográficos y, c) fotografía aérea (Tabla I). Los mapas históricos de Francisco Coello de 1858 y las cartas náuticas de Rafael Pardo de Figueroa han sido georreferenciados y digitalizados con ArcGis™ 10.2.

	Año	Escala	Lugar de descarga
Francisco Coello	1858	1: 200.000 (en leguas)	ICC
Rafael Pardo Figueroa	1887	-	ICC
Rafael Pardo Figueroa	1890	-	ICC
Mapa topográfico nacional	1918-1920	1:50.000	IGN
Mapa topográfico nacional	1938-1942	1:50.000	IGN
Vuelo Americano serie A	1946	1:10.000	ICC
Vuelo Americano serie B	1956	1:5.000	ICC
Ortofoto de Cataluña	1983	1:5.000	ICC
Ortofoto de Cataluña	2004	1:5.000	ICC
Ortofoto de Cataluña	2012	1:5.000	ICC

TABLA I. *Características de los materiales utilizados*

Para la corrección geométrica se han utilizado 8-10 puntos de control y se ha ajustado por transformación polinomial afín (primer orden) con un error medio de 49 m, para el mapa de Pardo Figueroa. Para la corrección geométrica del mapa de Francisco Coello se ha utilizado la transformación *splin*, que consiste en que los puntos de origen son exactamente los mismos puntos que los de destino durante la georreferenciación y por tanto no se generará ningún error residual. Estos valores serán solamente aproximaciones de la evolución ya que sólo se pueden considerar fiables a partir de los mapas topográficos de principios del siglo XX.

A partir de estas imágenes, los mapas topográficos y las ortofotos, se ha delimitado la llanura deltaica y las diferentes formas geomorfológicas. Finalmente con el programa DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) se han cuantificado los cambios en la línea de costa para el periodo 1890-2012. Tras caracterizar estas líneas y compararlas para distintos transectos (100 m), se ha calculado el parámetro NSM (*Net Shoreline Movement*) que mide la distancia media en entre las líneas de costa más alejadas cronológicamente.

RESULTADOS

1. Evolución del delta a través de la cartografía histórica

Francisco Coello (Fig. 1) representa con gran detalle la llanura deltaica y todos los elementos característicos que la integran: ganchos, lagunas, distributarios, etc. De este mapa cabe destacar los ganchos del Fangar y La Banya, con un área aproximada de 1,65 km^2 y 24,20 km^2 respectivamente (Fig. 5), y que están adquiriendo la morfología similar a la actual.

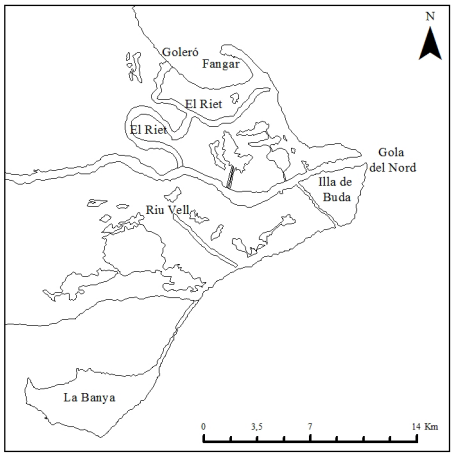


FIGURA 1. *El delta del Ebro según Francisco Coello en 1858*

También se puede observar con claridad el trazado del canal principal, similar al actual y la difluencia que rodea *l'Illa de Buda*. Entre los paleocauces más importantes cabe destacar hacia

el norte *El Riet*, donde el curso del río dibujaba un gran meandro que posteriormente dividía el curso en dos difluencias, que desembocaban por la boca del *Goleró* en la bahía del Fangar y otra en mar abierto, en dirección NE. Cartógrafos anteriores a Coello, como Tomás López (1776), ya representan con claridad esta antigua desembocadura que en 1858 ya no es funcional. También destacar el paleocauce que discurre en la parte sur del delta en dirección NO-SE, denominado *Riu Vell* que representaban en su estudio Canicio e Ibáñez (1999). En cuanto al lóbulo de la desembocadura destaca la gran similitud con la morfología actual, aunque entre ambos periodos ha cambiando sustancialmente.

El mapa de Rafael Pardo Figueroa (Fig. 2), representa la llanura deltaica con gran detalle, aportando además una batimetría muy detallada del prodelta. Los cambios más significativos respecto al mapa anterior son, el aumento de la superficie del delta y la acreción en los ganchos de la Banya y del Fangar (Fig. 5). La forma de estos ganchos cada vez se asemeja más a la actual, con unos límites más redondeados que han sido moldeados por la dinámica marina. Se puede constatar que la tendencia del delta en dicho momento es progradante.

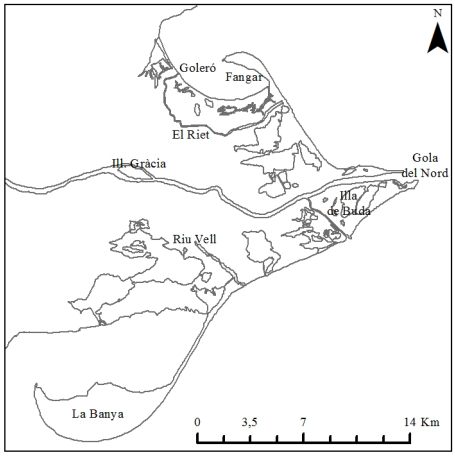


FIGURA 2. *El delta del Ebro según Rafael Pardo de Figueroa entre 1887-1890*

Los demás elementos como las difluencias y paleocauces no sufren variaciones, aunque en ambos mapas se observa que *el Riet* ya no es funcional. Además en el segundo mapa ya se representa *l'Illa de Gràcia*, y la desembocadura es mucho más apuntada sugiriendo una fuerte progradación del delta.

2. Evolución del delta a través del mapa topográfico nacional

La representación que hace el mapa topográfico de 1920 es muy similar a la del 1890, y también a la de 1940 con la diferencia de que en este último (Fig. 3) se abre un nuevo cauce, junto a la desembocadura principal, en dirección norte por una gran riada en el año 1937 (Riba y Serra, 1994). El delta sigue creciendo (Fig. 5) y la forma de los ganchos es muy similar a la actual. La forma apuntada de la desembocadura es similar a la de 1890 y se mantendrá hasta 1956. Por último, las lagunas de la parte norte del delta tienden a aumentar su tamaño mientras que las de la parte sur tienden a disminuir.

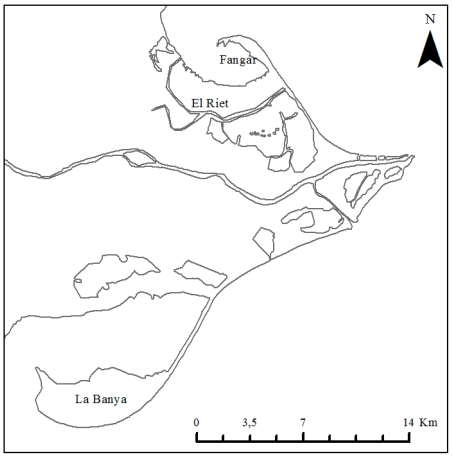


FIGURA 3. *Representación del delta del Ebro en 1940*

3. Evolución del delta a través de la ortofotografía

El análisis de las distintas ortofotografías (Fig. 4) muestra con gran precisión la evolu-

ción que ha seguido el delta, mostrando una tendencia progradante hasta el 1956, que cambiará a una fase erosiva que continúa en la actualidad (Fig. 5).

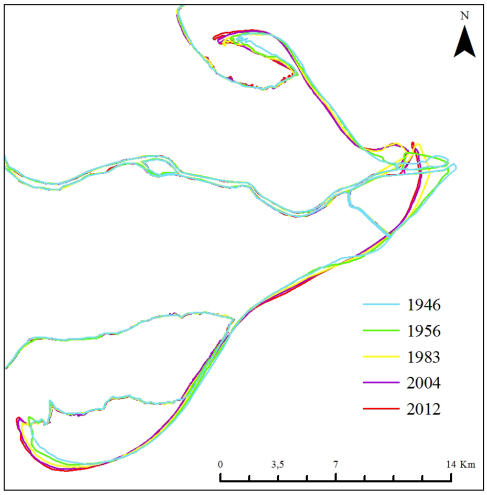


FIGURA 4. *El delta del Ebro representado para los años 1946, 1956, 1983, 2004 y 2012*

Esta evolución se aprecia con gran claridad en la desembocadura y los ganchos. La desembocadura ha perdido su forma apuntada y ha pasado a tener una forma mucho más redondeada, similar a la de Coello (1858). Además la riada del 1937, abre nuevas golas hacia el norte, de manera que, con el tiempo, esta zona se ha convertido en la principal desembocadura (Fig. 4). Respecto los ganchos, ambos aumentan su superficie (Fig. 5) y además crecen en dirección oeste, cerrando parcialmente las bahías del Fangar y Alfacs en la parte norte y sur del delta.

4. Tendencias evolutivas del delta entre 1858 y 2012

El análisis de los mapas y ortofotos muestra como han ido variando su superficie de la llanura a lo largo del tiempo (Fig. 5). En 1858 el delta se encontraba en un momento de progradación, con una superficie aproximada de 307,21 km^2, que continuará creciendo hasta el año 1956, aunque de una forma más pausada que en siglos pasados (Maldonado, 1972; Canicio e Ibáñez, 1996).

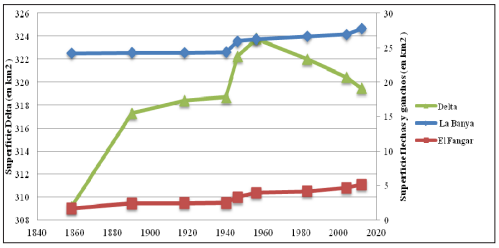


FIGURA 5. *Evolución del delta entre 1858-2012. La superficie del delta incluye las zonas húmedas, las flechas y los ganchos. Para una mejor comprensión de los procesos se ha representado separadamente la evolución de La Banya y el Fangar*

A partir de este momento la llanura deltaica va menguando poco a poco, debido a la disminución del caudal, que sigue una tendencia decreciente durante el último siglo, y a la falta de sedimento. Ambos efectos son consecuencia de la construcción de embalses, que regulan los caudales y retienen la mayor parte de los sedimentos, de forma que se estima que al delta sólo llega el 1% de los sedimentos que llegaban al delta a principios del siglo XX (Guillén y Palanques, 1992).

Dentro de la llanura deltaica encontramos zonas donde se está produciendo acreción frente a otras donde se produce erosión. Esto es debido a la falta del aporte sedimentario y a la acción de las corrientes litorales, erosionan la desembocadura y redistribuyen el sedimento hacia los ganchos.

Los vientos provenientes del ENE y ESE generan dos corrientes litorales, hacia el sur y hacia el norte, que redistribuyen el sedimento, alimentando los ganchos. Las zonas donde se está produciendo acreción son los ganchos situados al final de las flechas de La Banya y del Fangar, donde la superficie ha aumentando considerablemente durante el tiempo de estu-

dio (Fig. 5). También cabe destacar que las flechas pivotan hacia la costa, por lo que, con su crecimiento, están cerrando parcialmente las bahías del Alfacs y el Fangar, respectivamente. Con el tiempo podrían llegar a aislar estas bahías del mar creando albuferas (Fig. 6).

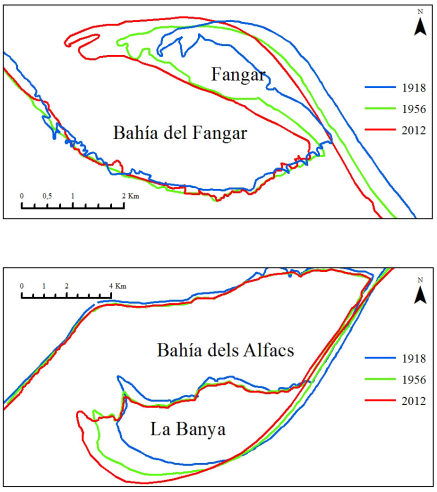


FIGURA 6. *Evolución de las flechas del Fangar y La Banya entre 1918 y 2012*

Finalmente, el análisis de las líneas de costa nos da una visión a largo plazo de la evolución del delta. Los datos para el conjunto del período muestran unas tendencias muy claras en los diferentes sectores (Fig.7). Tal y como se puede observar en la figura 8, correspondiente a la estadística NSM, los valores más altos de retroceso de la línea de costa se encuentran en la desembocadura, con valores máximos en el primer caso que oscilan entre -2600 y -2100 metros.

En el caso de las flechas, se produce erosión en la cara externa, con valores que oscilan entre -600 y -700 metros en el Fangar (Norte) y entre -500 y -600 en el Alfacs (Sur). Por tanto, en este período se observa que la flecha septentrional ha sufrido una erosión más acusada que la meridional, ya que la dinámica marina predominante aporte sedimentos fundamentalmente en dirección sur. Por su parte las flechas sufren un proceso de pivotación hacia la costa, con procesos erosivos que se compensan en su cara interna, asociados normalmente a los episodios de temporales.

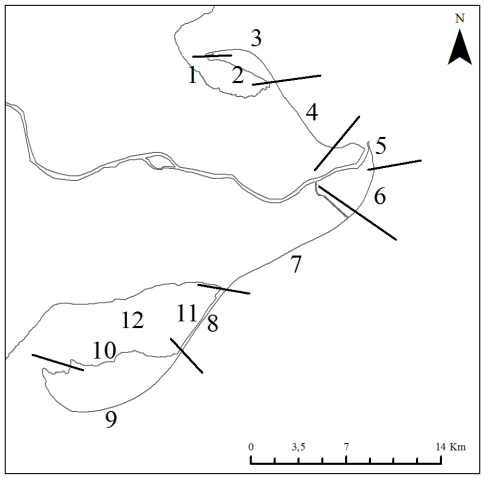


FIGURA 7 . *Sectores utilizados para el análisis de la línea de costa*

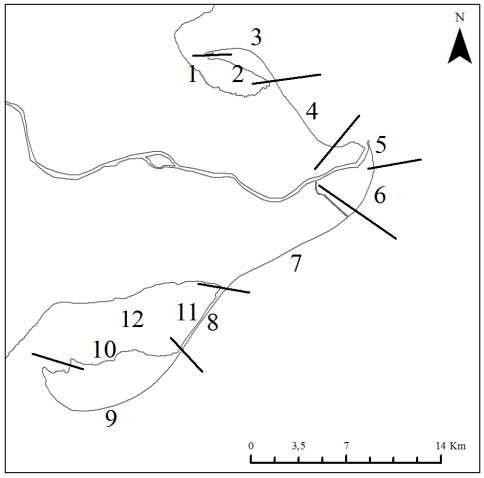


FIGURA 9. *NSM (Net Shoreline Movement) para el periodo 1890-2012. Siendo: Cara norte delta (1), cara interna del Fangar (2), cara externa del Fangar (3), lóbulo antiguo (4), desembocadura actual (5 y 6), cara externa Trabucador (7), final Trabucador (8), cara externa La Banya (9), cara interna de La Banya (10), cara interna Trabucador (11) y, costa sur del delta (12)*

Los valores de acreción del delta se localizan principalmente en los ganchos, en la playa de los Eucaliptus (SE) y en la playa de Riumar (E). Dichos valores rondan entre 700 y 2000 metros de avance de la costa en La Banya y entre 400 y 800 metros en la cara interna del Fangar. También se puede observar que mientras que la cara externa del gancho de la Banya es fuertemente acrecional, la cara externa del gancho del Fangar es ligeramente erosiva, dada la mayor pivotación de la flecha, concentrándose la acumulación en la cara interna.

DISCUSIÓN Y CONCLUSCIONES

Los resultados obtenidos son coherentes con las investigaciones realizadas por otros autores. Por lo que respecta a la evolución general del delta, los datos muestran una tendencia general a la disminución de su superficie (Fig. 5). Durante los siglos XV y XVI, se ha estimado que la superficie del delta ha incrementado una media de 50 m/año (Valls, 2015), debido a la fuerte deforestación sufrida por la cuenca, cuyos bosques se utilizaban para la construcción de barcos para las nuevas expediciones transoceánicas (Somoza, 2015). Entre los siglos XVII y XVIII se han producido cambios significativos en la ubicación de las desembocaduras (Maldonado y Riba, 1971; Maldonado, 1972). Durante el siglo XIX, el aporte de sedimentos se ha estimado en 25 x 10^6 tn/año (Guillen y Palanques, 1997), tendencia que ha cambiado a lo largo del siglo XX, cuando se produce una fuerte merma del caudal circulante debido a la construcción de embalses, que retienen el agua y sedimento (Dolz *et al*., 1997; Guillen y Palanques, 1997; Sánchez-Cholís y Sarasa, 2015).

La reducción de las aportaciones sólidas y líquidas ha provocado cambios muy importantes a partir de los años 60 del siglo XX. La construcción de más de 200 embalses en la cuenca y sobre todo la construcción de los embalses de Mequinenza (1964) y Ribarroja (1969) ha producido una disminución de un 99% de la carga sedimentaria, que queda retenida en los embalses (Guillén y Palanques, 1992; Ibáñez et al., 1996). La diferencia evolutiva es clara antes y después de 1969, fecha de la construcción del último embalse y se observa una disminución de la superficie de la llanura deltaica (Fig. 5). En ella se observa cómo algunos sectores que fueron progradantes en régimen natural se han vuelto erosivas en la segunda fase, siendo especialmente importante el retroceso en la desembocadura actual (Fig. 8).

Una de las cuestiones importantes que plantea este trabajo es que la erosión del delta no es uniforme, ya que la llanura deltaica sufre una fuerte disminución de su superficie, pero los sedimentos erosionados se depositan en los ganchos que crecen de forma continuada. Así pues, la superficie total del delta no ha sufrido cambios drásticos desde los años 70, pero sí que se ha producido una redistribución de los sedimentos que llegan al delta.

En conclusión, el presente trabajo confirma los resultados apuntados por otros autores que han trabajado a una escala temporal más corta. La sistematización de los resultados permite ampliar y detallar aun más la evolución del delta desde la segunda mitad del siglo XIX hasta la actualidad.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación CGL2013-44917-R del Ministerio de Economía y Competividad. Ha contado también con fondos FEDER.

REFERENCIAS

Alvarado-Aquilar, D., Jiménez, J. A. y Nicholls, R. J. 2012. Flood hazard and damage assessment in the Ebro delta (NW

Mediterranean) to relative sea level rise. *Natural hazards*, 62, 1301-1321.

Canicio, A. y Ibáñez, C. 1999. The holocene evolution of the Ebre delta catalonia, Spain. *Acta geographica sinica* (5), 462-469.

Dolz, J., Gómez, M. y Nieto, J. 1997. El Ebro en el delta. *Revista de obras públicas*, 3368, 7-14.

Guillén, J. y Palanques, A. 1992. Transporte de sedimentos en suspensión en la parte baja del río Ebro (Mediterráneo Occidental). Impacto ambiental de las presas. *Geogaceta*, 12, 37-40.

Guillén, J. y Palanques, A. 1997. A historical perspective of the morphological evolution in the lower Ebro river. *Environmental Geology*, 30 (3/4), 174-180.

Ibañez, C., Prat, N. y Canicio, A. 1996. Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary. *Regulated rivers: research and management*, 12, 51-62.

Maldonado, A. y Riba, O. 1971. El delta reciente del río Ebro: descripción y evolución. *Acta geológica hispánica*, 5, 131-138.

Maldonado, A. 1972. El delta del Ebro: estudio sedimentológico y estratigráfico. *Boletín de estratigrafía*, 1, 1-486.

Riba, O. y Serra, J. 1993. El delta de l'Ebre, una área geológica amenaçada. *"SOS,-SOS" Bulletí de la Inst. Cat. D'Història Natural,* 61, 117-133.

Sánchez-Chóliz, J., y Sarasa, C. (2015). River flows in the Ebro basin: A century of evolution, 1913–2013. *Water*, *7*(6), 3072-3082.

Somoza, L., Barnolas, A., Arasa, A., Maestro, A., Rees, J. G. y Hernández-Molina, F. J. 1998. Architectural stacking patterns of the Ebro delta controlled by Holocene high-frequency eustatic fluctuations, delta-lobe wsitching and subsidence processes. *Sedimentary geology*, 117, 11-32.

Valls, A. 2015. El delta del Ebro a través de la cartografía histórica: análisis de su evolución desde el siglo XV hasta mediados del siglo XIX. Trabajo de final de Grado. Documento inédito.