



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

Water erosion in Aragón: a bibliographic review

Autora

Celia Palacio Romeo

Directora

María Teresa Echeverría Arnedo

Grado en Geografía y Ordenación del Territorio

Facultad de Filosofía y Letras

Universidad de Zaragoza

(2017/2018)

Resumen

La erosión hídrica es un proceso ambiental que está incidiendo de manera acusada en los ambientes áridos, semiáridos y subhúmedos del mundo, entre los que se encuentra buena parte de nuestra comunidad, siendo el principal factor desencadenante de la desertificación. Este trabajo pretende realizar una revisión bibliográfica sobre el concepto de erosión con el objetivo de conocer los principales factores que intervienen en su generación, sus tipos y sus métodos de cuantificación. En segundo lugar, se explican las características ambientales de Aragón que hacen que esta región se incluya dentro de las áreas semiáridas mundiales y que cuente con tan elevadas tasas de erosión. También se realiza un comentario sobre los trabajos de erosión llevados a cabo en Aragón, destacando las temáticas fundamentales de los mismos y los principales investigadores sobre el tema.

Por último, se realiza una reflexión sobre la sobreexplotación a la que se ha visto sometido el suelo a lo largo de la historia, destacando el importante papel que han tenido las labores agrícolas en este proceso desde el nacimiento de la agricultura en el Neolítico y sobre cómo el abandono de tierras, pese a parecer una solución para la recuperación del suelo, no siempre supone una reducción de la erosión.

Palabras clave: erosión hídrica, suelo, semiárido, sobreexplotación

Abstract

Water erosion is an environmental process that is strongly affecting the arid, semi-arid and sub-humid environments of the world, and our autonomous community is a good example, being the main trigger of desertification. This project aims to conduct a bibliographic review on the concept of erosion in order to know the main factors involved in their generation, the erosion processes and methods of quantification. Secondly, we find an explanation of the environmental characteristics of Aragón, which make this region to be included in the world's semi-arid areas and to have such high erosion rates. There is also a comment on the erosion works carried out in Aragón, highlighting the fundamentals of the same and the main researchers on the subject. Finally, a reflection on the overexploitation to which the soil has been subjected throughout history is made, highlighting the important role that agricultural work has had in this process since the birth of agriculture in the Neolithic and how the abandonment of land, despite appearing to be a solution for soil recovery, does not always mean a reduction in erosion.

Key words: water erosion, soil, semi-arid, overexploitation

Índice del documento

1. Introducción.....	1
2. Justificación del trabajo y estado de la cuestión. La erosión de suelo como problema: desertización y desertificación	7
3. Objetivos	10
4. Metodología relacionada con el carácter bibliográfico del trabajo	11
5. El concepto de erosión: definición y diferenciación	12
5.1. Factores que influyen en la erosión	15
5.2. Tipos de erosión.....	19
5.3. Métodos y técnicas para el estudio de la erosión (valores tn/ha/año).....	21
6. Procesos erosivos en el medio morfoclimático semiárido aragonés.....	32
6.1. Condiciones semiáridas del territorio aragonés.....	32
6.2. Erosión hídrica del suelo en el entorno semiárido aragonés.....	47
6.2.1. Estado de la cuestión de trabajos relacionados con la erosión hídrica	47
6.2.2. Reflexión sobre la erosión antrópica. Sobreexplotación agrícola y ganadería. Abandono de usos tradicionales del suelo	55
7. Conclusiones	60
8. Bibliografía.....	63

Índice de tablas, figuras y fotografías

Tabla 1.- Procesos de degradación del suelo según diversos autores. Fuente: Martín de Santa Olalla Mañas, 2001. Página 5

Tabla 2. - Interpretaciones y definiciones del término "erosión tolerable del suelo". Fuente: Verheijen et al. 2009. Página 9

Tabla 3.- Erosión versus usos del suelo. Fuente: Soto, 1990 (Almorox et al. 2010). Página 18

Tabla 4.- Características ambientales y edáficas de las zonas semiáridas. Fuentes: Fernández Gálvez, Jesús y Gutiérrez Elorza 2001). Página 34

Tabla 5. – Tasas de erosión estimadas a partir de trabajos realizados en el Sector Central de la Depresión del Ebro (Aragón). Fuente: Elaboración propia a partir de los trabajos de Glez. Hidalgo (1992), Desir Valen (1992), Perez-Cabello et al. (2010), T. Lasanta et al. (2008) y D. Badía et al. (2015)

Tabla 6. - Tasas de erosión estimadas a partir de los trabajos realizados en diferentes sectores del Pirineo Central (Aragón) Fuente: elaboración propia a partir de los trabajos de Ruiz Flaño (1993), T. Lasanta et al. (2006) y Beguería-Portugués (2010). Página 54

Figura 1.- Tipos de degradación ambiental. La degradación de los suelos. Fuente: Almorox Alonso et., al (2010). Página 13

Figura 2.- Principales factores que afectan a la erosión hídrica. Fuente: López Bermúdez, 2002. Página 16

Figura 3.- Tipos de erosión de suelo, según origen y agente causante. Fuente: Almorox Alonso et., al (2010). Página 20

Figura 4.- Tipología de métodos de estimación de la erosión hídrica. Fuente: Almorox Alonso et., al (2010). Página 22

Figura 5.- Mapa de pérdidas de suelo en Aragón y España. Fuente: IGN (2000). Página 30

Figura 6.- Mapa de la distribución de las tierras áridas del mundo. Fuente: FAO, 2002. Página 32

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

Figura 7.- Mapa de aridez de España. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPAMA). Fuente: internet. Página 33

Figuras 8 y 9.- Distribución de la temperatura media anual en Aragón y Distribución de los valores de precipitación media anual en Aragón. Fuente: Cuadrat Prats, 2004. Página 37

Figuras 10 y 11. -Distribución de los suelos y la vegetación actual de Aragón. Fuentes: Badía et al. (2007) y Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza. Página 37

Figura 12.- Mapa de distribución de la Evapotranspiración potencial anual en Aragón. Fuente: López Martín et al., 2007. Página 38

Figura 13.- Mapa de distribución de los valores obtenidos de la aplicación del índice de aridez en Aragón. Fuente: López Martín et al. (2007): Atlas Climático de Aragón. Edita: Gobierno de Aragón. Página 39

Figura 14. -Mapa geomorfológico de Aragón dividido por provincias (Huesca, Zaragoza y Teruel respectivamente). Las zonas más erosionables -colores beige-, representan formaciones detríticas y evaporíticas (yesos y sales) terciarias. Fuente: Peña Monné et al. 2002. Página 42

Fotografía 1.- Arenisca calcárea oligocena colonizada por líquenes y afectada por una intensa descamación. Depresión del Ebro. Albeda (provincia de Huesca). Fuente: (Gutiérrez Elorza, 2001). Página 44

Fotografía 2.- Eflorescencias salinas en areniscas calcáreas miocenas de la Depresión del Ebro. El Tormillo (provincia de Huesca). Fuente: (Gutiérrez Elorza, 2001). Página 44

Fotografía 3.- Tafonis sobre una pared rocosa constituida por areniscas calcáreas del Oligoceno, en la depresión del Ebro. Albelda (provincia de Huesca). Fuente: (Gutiérrez Elorza, 2001). Página 45

Fotografía 4.- Gnammas en pozo o pits, de desigual desarrollo, elaboradas en areniscas miocenas en la Depresión del Ebro. Región de Alcañiz (provincia de Teruel). Fuente: (Gutiérrez Elorza, 2001). Página 46

Fotografía 5.- Pipes, colapsos y puentes en argilitas holocenas, que en su evolución desarrollan regueros o pequeños barrancos. Lupiñén (provincia de Huesca). Página 47

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

Fotografía 6.- Modelo de evolución de campos abandonados con fuerte intervención humana. El modelo contempla la ocurrencia de frecuentes incendios que aumentan periódicamente la producción de sedimento al interrumpir la sucesión vegetal, mientras la pedregosidad superficial se incrementa con el tiempo debido a la erosión de materiales finos. Fuente: (Ruiz Flaño et al., 1992 en García Ruíz y López Bermúdez 2009). Página 53

1. Introducción

La **erosión** es uno de los principales procesos que intervienen en la degradación de los suelos y uno de los problemas ambientales más graves a los que se enfrenta Aragón, en determinados ámbitos territoriales. De forma muy sintetizada, la erosión del suelo se refiere al proceso por el cual uno o varios agentes erosivos, normalmente el agua o el viento, remueven las partículas del suelo produciéndose así una pérdida del mismo. Pese a ser un proceso natural, resultante de la interacción entre varios factores, ya desde el Neolítico, con la aparición de la agricultura, la erosión está fundamentalmente ligada con las actividades antrópicas y, sobre todo, con las labores agrarias. Desde entonces, las sociedades humanas han sometido al suelo a numerosas modificaciones en función de sus intereses, produciendo su deterioro progresivo hasta extremos irrecuperables en muchas zonas.

La **degradación del suelo** es un proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir (cuantitativa y/o cualitativamente) bienes o servicios (FAO/PNUMA, 1980 en Martín de Santa Olalla Mañas, 2001) debido a una serie de cambios físicos, químicos y/o biológicos en las propiedades y procesos edáficos que llevan a una disminución de la calidad del suelo (Martín de Santa Olalla Mañas, 2001). Los efectos de la degradación implican la reducción de la capacidad de los suelos para soportar vida; la pérdida de su riqueza y diversidad y la reducción de su funcionalidad como filtradores de las aguas, productores de biomasa, recicladores de la materia orgánica, liberadores de nutrientes para las plantas y filtros clave para los ciclos biogeoquímicos (Cerdà, 2008). Los **procesos de degradación** son los mecanismos responsables de la disminución de la calidad del suelo, los cuales suelen ser frecuentemente múltiples e interactuantes, lo que ha llevado a establecer diferentes agrupaciones (Tabla 1) diferenciando entre procesos de degradación física, química y biológica, aunque, casi siempre se produzcan de forma simultánea (Martín de Santa Olalla Mañas, 2001). No obstante, de todos los procesos de degradación cabe destacar la erosión y, sobre todo, la **erosión hídrica** como uno de los más importantes a cualquier escala espacial dada su importancia en el avance la desertificación, especialmente en ambientes subhúmedos y semiáridos (López Bermúdez y García Ruiz en Cerdà, 2008) como los que encontramos en Aragón.

Así pues, esta revisión bibliográfica va a estar dividida en dos partes, que, aunque diferenciadas, son totalmente complementarias: una primera parte está enfocada al

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

estado de la cuestión sobre los aspectos más generales del proceso de erosión **hídrica** como su definición, sus tipos o sus diferentes métodos de estimación; mientras que la otra parte está más centrada en la exposición de los rasgos ambientales característicos de Aragón como espacio semiárido y frágil a la erosión, en el comentario del estado de la cuestión sobre los trabajos realizados en Aragón y en la reflexión sobre cómo la sobreexplotación del recurso suelo durante millones de años ha provocado que este proceso ambiental sea uno de los más preocupantes en la actualidad.

Fuente	Tipos	Procesos
FAO/PNUMA (1980)	Erosión hídrica	
	Erosión eólica	
	Exceso de sales	Salinización
		Sodificación
	Degradación química	Lixiviación de bases
		Acumulación de elementos tóxicos como metales pesados
	Degradación química	Apelmazamiento
		Encostramiento
		Reducción de la permeabilidad
		Compactación
Yssoglou (1987)		Falta de aireación
		Degradación de la estructura
		Limitaciones a la radiación
	Degradación biológica	Pérdida de materia orgánica
	Pérdida de volumen	Erosión
		Compactación
		Encharcamiento
	Degradación de la estructura	Erosión
		Rotura mecánica
		Alcalinización
		Encharcamiento
		Pérdida de materia orgánica
		Impacto de las gotas de lluvia
		Sedimentación
	Pérdida de materia orgánica y disminución de la actividad biológica	Erosión
		Manejo exhaustivo
		Excesivo drenaje
	Degradación química	Lavado de bases
		Acidificación
		Salinización
		Alcalinización
		Carbonatación
		Contaminación química

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

		Fertilización inadecuada
		Erosión
		Sedimentación
	Deterioro de la fertilidad	Erosión
		Lavado de bases
		Fijación
		Volatilización
		Manejo exhaustivo
Lal et al., (1990)	Degradación física	Compactación
		Laterización
		Erosión y desertificación
	Degradación química	Reducción de la fertilidad
		Acidificación
		Sodificación
		Acumulación de compuestos tóxicos
	Degradación biológica	Disminución de la materia orgánica
		Reducción de la macro y microfauna del suelo
UNEP (1992)	Por desplazamiento del material	Erosión hídrica
		Erosión eólica
	Deterioro interno del suelo por procesos físicos	Compactación
		Sellamiento superficial
		Encostramiento superficial
		Sodificación
		Encharcamiento
		Aridificación
		Subsidencia de suelos orgánicos
	Deterioro interno del suelo por procesos químicos	Salinización
		Pérdida de nutrientes
		Pérdida de materia orgánica
		Acidificación
		Contaminación

Tabla 1.- Procesos de degradación del suelo según diversos autores. Fuente: Martín de Santa Olalla Mañas, 2001

2. Justificación del trabajo y estado de la cuestión. La erosión de suelo como problema: desertización y desertificación

Según un resumen técnico sobre *El Estado Mundial del Recurso Suelo* realizado por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015), "la erosión del suelo es una de las diez amenazas para las funciones del suelo junto con la pérdida de CO₂, el desequilibrio de nutrientes, la acidificación del suelo, la contaminación del suelo, el anegamiento, la compactación del suelo, el sellado del suelo, la salinización y la pérdida de biodiversidad del suelo".

En Aragón, la pérdida de suelo es uno de los procesos ambientales con mayor incidencia, siendo especialmente significativo en un 12% del territorio de la comunidad según anunciaba a fecha de 2003 el Periódico de Aragón. El mismo periódico afirmaba también que más de la mitad del territorio aragonés estaba en ese momento afectado por un nivel de erosión muy preocupante.

El proceso erosivo ha estado agravado e incentivado en la mayoría de los casos por diversas acciones antrópicas, como son las distintas labores ligadas a los espacios agrarios. Estas actividades desarrolladas en nuestra comunidad a lo largo de la historia han supuesto la modificación progresiva de las condiciones del suelo, haciéndolo más frágil ante los agentes erosivos y haciendo, por tanto, que este pierda su estructura y fertilidad.

No obstante, es interesante e importante plantearse una cuestión referida a todo lo anterior y es **¿cuándo comenzó la erosión a ser considerada un problema?** La respuesta es sencilla: cuando comenzó a suponer un problema para el hombre poniendo en riesgo sus sistemas políticos y económicos en mayor medida (Cerdà, 2008). La erosión es un proceso natural, pero la acción del hombre en la aceleración e intensificación de este proceso ha hecho que muchas veces existan quienes hayan cuestionado esa naturalidad. Así pues, el hombre fue quien, mediante el desarrollo de sus actividades, fue aumentando la intensidad y las consecuencias del proceso erosivo sobre el medio, siendo uno de los principales factores desencadenantes de otro proceso ambiental muy conocido: la desertificación.

La **desertificación** está considerada junto al cambio climático y la biodiversidad uno de los problemas ambientales más graves de la actualidad. Hace referencia al proceso de degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas

secas, resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas y que se interpreta como una disminución de los niveles de productividad de los geosistemas (López Bermúdez, 2010). La combinación de factores y procesos como la aridez, la sequía, la erosión, los incendios forestales, la sobreexplotación de acuíferos, etc., da origen a los distintos paisajes o escenarios típicos de la desertificación en España (MAPAMA, 2018). No obstante, es importante no confundir este concepto con el de **desertización**, el cual alude al proceso de deterioro natural del clima hacia una mayor aridificación y aleatoriedad de las precipitaciones (López Bermúdez, 2010).

En el momento en el que el hombre comenzó a ser consciente de las consecuencias de sus acciones sobre el territorio a través de las repercusiones socioeconómicas ligadas a la pérdida de productividad por la desertificación, desarrolló términos como el de “**erosión tolerable**” (Verheijen et al. 2009), el cual, aunque posee muchas definiciones (Tabla 2), hace referencia básicamente a la tasa máxima de erosión de suelo que permite que se sostenga un alto nivel de productividad. Este término, al igual que todos sus similares, se utiliza como una guía para la planificación en la conservación de suelos, sin embargo, no refleja una preocupación del medio ambiente en sí mismo, sino una preocupación por la afección al propio agente causante del problema, el ser humano.

Así pues, dada la relevancia del suelo para la vida humana, la falta de preocupación general en las cuestiones ambientales referidas al mismo, siendo la erosión uno de los principales indicadores que denotan su degradación y siendo Aragón una comunidad muy vinculada con el mundo agrario y con tan elevadas tasas de erosión, este trabajo ha querido realizar una revisión bibliográfica con el objetivo de conocer más sobre el proceso ambiental de la erosión y poder contar con un conocimiento crítico sobre el mismo.

Definición de “erosión tolerable”	Referencia
The maximum volume of erosion-removed topsoil that provides high, or economically feasible, fertility for a long time	Patsukevich et al., 1997.
Soil loss balanced by soil formation through weathering of rocks	in Roose (1996)
Erosion that does not lead to any appreciable reduction in soil productivity	in Roose (1996)
The maximum rate of soil erosion that permits an optimum level of crop productivity to be sustained economically and indefinitely	ISSS (1996)
The average annual soil loss a given soil type may experience and still maintain its productivity over an extended period of time (permissible soil loss)	Kok et al. (1995)
The maximum permissible rate of erosion at which soil fertility can be maintained over 20-25 years	Morgan (2005)
(i) The maximum average annual soil loss that will allow continuous cropping and maintain soil productivity without requiring additional management inputs. (ii) The maximum soil erosion loss that is offset by the theoretical maximum rate of soil development which will maintain an equilibrium between soil losses and gains	SSSA (2001)
Rate of soil erosion is not larger than the rate of soil production (acceptable rates of soil erosion)	Boardman and Poesen (2006)

Tabla 2. - Interpretaciones y definiciones del término “erosión tolerable del suelo”.
Fuente: Verheijen et al. 2009

3. Objetivos

Nuestra actualidad mediática está caracterizada por la posibilidad de acceder de forma rápida y sencilla a una gran cantidad de información referida a cualquier tema. Sin embargo, la existencia de tanta información disponible hace que, en algunos momentos sea difícil precisar determinadas cuestiones.

Por todo ello, esta revisión está enfocada a:

- Realizar una recopilación organizada de la información más relevante existente referida al concepto de erosión, sus tipos y los principales métodos para su estimación.
- Servir como pequeña referencia para la consulta de algunos conceptos y como una sintetizada y precisa guía que pueda usarse como introducción al conocimiento ambiental de la erosión, de tal modo que no sea necesario ser pleno conocedor del tema para poder entender este documento, estando así dirigido a un público más amplio.
- Ofrecer una idea precisa sobre el estado de la erosión en los espacios aragoneses, mostrando con esto la fuerte correlación existente entre las actividades humanas (agricultura, ganadería, abandono de tierras...) y la erosión en estos ámbitos. Referido a esto último, no es nuevo el afirmar que nos encontramos en un momento marcado por la existencia de grandes problemas ambientales entre los cuales, destacan aquellos relacionados con la contaminación de la atmósfera o las aguas, mientras que aquellos problemas relacionados con el suelo, como la erosión, han “pasado de moda” ante temas como el agua o el CO₂, aunque el suelo sea uno de los sustentos fundamentales de nuestra existencia.
- Mostrar como el aumento de las actividades humanas a lo largo del tiempo en el territorio aragonés ha supuesto un aumento de las tasas de erosión del mismo, de tal forma que la lectura de este documento sirva para concienciar del grave problema que supone la erosión sobre todo en nuestra comunidad, intentando a su vez, destacar el importante papel que tiene el suelo para el desarrollo de la vida.

4. Metodología relacionada con el carácter bibliográfico del trabajo

En cuanto a la metodología empleada para la realización de este trabajo, al igual que cualquier revisión bibliográfica, ésta se ha basado fundamentalmente en la **búsqueda de documentación** diversa como libros, mapas, revistas o artículos de investigación, entre otros. Sin embargo, a parte de la búsqueda de documentación también se ha tenido que realizar posteriormente una selección, organización, análisis y contraste de la información encontrada, por lo que se podría decir que la metodología en este trabajo ha estado dividida en varias fases.

Tras la búsqueda general de documentación, se ha procedido, en segundo lugar, a la **fase de selección**, la cual ha consistido en escoger aquella información verdaderamente relevante y acorde con el tema y con los apartados que integran este trabajo, utilizando en varias ocasiones tan solo unos pocos capítulos de un libro o tan solo algunos apartados de un artículo.

En tercer lugar y con la información de partida más relevante escogida, se ha procedido a la **organización de ésta según temas o relevancia**, intentando así simplificar el proceso de búsqueda de aspectos concretos dentro de los temas.

En cuarto lugar, se ha **analizado la información** mediante la lectura, comprensión y síntesis de la misma.

5. El concepto de erosión: definición y diferenciación

Existen diversos procesos que afectan a los suelos y que, por tanto, intervienen en su degradación. Tras una primera consulta bibliográfica, es preciso afirmar que en numerosas ocasiones el término “degradación de los suelos” no está bien diferenciado del término “degradación de la tierra” y suelen confundirse, al igual que tampoco se diferencia correctamente entre suelo, formación superficial y sustrato litológico. Por ello, es necesario realizar unas definiciones previas claras y concisas sobre estos términos antes de precisar más sobre otras cuestiones que se plantean en el trabajo.

De forma más concreta, la **erosión de los suelos** hace referencia al conjunto de procesos (arrastre de material suelo por agentes móviles como el agua, el viento o el hielo, la meteorización o los movimientos en masa) que intervienen en la evolución natural del relieve (rebajamiento de laderas, apertura de valles, encajamiento de la red fluvial, creación de almacenes temporales de sedimento...) (Lupia Palmeri, 2004 en García Ruíz y López Bermúdez, 2001). Estos procesos tienden a actuar siguiendo un ritmo “geológico” muy lento que, casi siempre es inferior a la velocidad de formación de suelo, por lo que a priori este fenómeno natural no podría considerarse un problema (García Ruíz y López Bermúdez, 2001). Sin embargo, actividades humanas como la práctica de técnicas agrarias inadecuadas, los cambios de uso del suelo o la deforestación (Almorox Alonso et., al 2010) han provocado tal aumento de las tasas de erosión, que hoy en día constituye un proceso de degradación que resulta destructivo al fomentar la pérdida de suelo (Lal y Stewart, 1990 en Camargo et al., 2017) y, desde hace décadas, se percibe como uno de los problemas ambientales más importantes del mundo (López Bermúdez, 2002 en (García Ruíz y López Bermúdez, 2001).

Como ya se ha explicado anteriormente, la **degradación del suelo** es un proceso que altera de manera negativa la calidad de los suelos y es importante no confundirlo con el término **degradación de tierras**, el cual según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) abarca un alcance más amplio que la erosión y degradación de suelos en conjunto, ya que cubre todos los cambios negativos en la capacidad del ecosistema para prestar bienes y servicios (incluso biológicos y servicios y bienes relacionados con el agua y también su relación con bienes y servicios sociales y económicos). Por su parte, (López Bermúdez, 2002)

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

de forma más precisa, define la degradación de tierras como como la reducción o la pérdida de la productividad biológica o económica y la complejidad de las tierras agrícolas de secano, las tierras de cultivo de regadío o las dehesas, los pastizales, los bosques y las tierras abandonadas, ocasionada, en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, por los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o una combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas y pautas de poblamiento, tales como la erosión del suelo; el deterioro de las propiedades físicas, químicas, biológicas y económicas del suelo y la pérdida duradera de vegetación natural. .

Así pues, podemos establecer que la erosión es uno de los procesos que interviene en la degradación de los suelos y ésta, uno de los tipos de degradación que afecta a la degradación ambiental del Planeta (Figura 1), por lo que podríamos afirmar que cada término está integrado en su anterior.

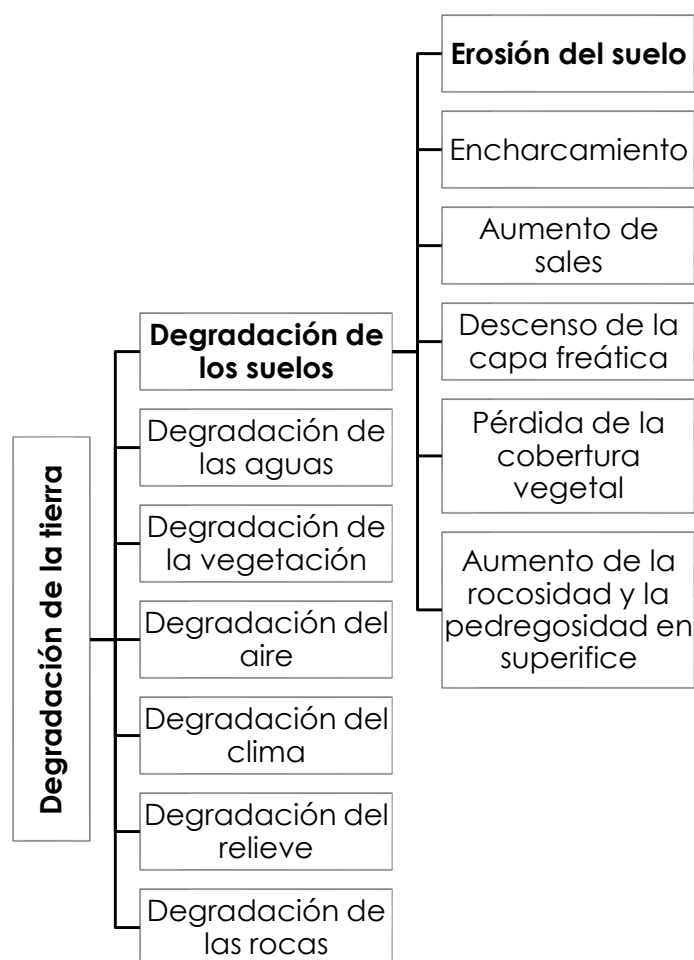


Figura 1.- Tipos de degradación ambiental. La degradación de los suelos. Fuente: Almorox Alonso et. al (2010)

En cuanto al dónde se produce la erosión, la erosión actúa en la parte superficial del perfil edáfico, allí donde más nutrientes y materia orgánica se acumulan, con lo que las partículas minerales y orgánicas son fácilmente arrastradas (Cerdà, 2008). De aquí se desprende otra precisa diferenciación entre suelo, formación superficial y sustrato litológico, puesto que es importante establecer dónde realmente es preocupante que se produzca erosión.

La **formación superficial** se encuentra ubicada sobre el sustrato litológico de la superficie terrestre y bajo el suelo, por lo que se podría decir que es la franja que separa estos dos últimos y que, por tanto, se alimenta de ambos. De forma general, los depósitos superficiales no están estratificados y constituyen depósitos geomorfológicos recientes.

La definición de **suelo** puede variar mucho en función de a qué aspecto se preste más atención. Atendiendo a su origen, localización y funcionalidad el suelo se puede definir como el material mineral no consolidado u orgánico localizado en la superficie inmediata de la Tierra que muestra los efectos que sobre él han tenido los factores genéticos y ambientales del clima (efectos de la temperatura y el agua) y los macro y microorganismos condicionados por el relieve, actuando sobre un material de origen (formación superficial o sustrato litológico) a lo largo de un periodo (Porta et al. 1999). Cabe destacar que, bajo ecosistemas de regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas el suelo es un recurso no renovable que está sometido a una fuerte presión antrópica (Almorox Alonso et al. 2010).

Pese a ser la función productiva del suelo la más utilizada por la humanidad desde tiempos remotos, ésta no es la única que posee y, desde hace años, se tiende a considerar otras funciones que toman en cuenta aspectos más globalizadores del suelo. (Martín de Santa Olalla Mañas, 2001). En este sentido, Blum y Aguilar (1994) consideran que el suelo desempeña 6 funciones básicas, no siempre complementarias, que entran en competición cuando el hombre utiliza el territorio:

1. Producción de biomasa, suministrando alimentos, energía renovable y materias primas como base para la vida humana y animal
2. Actuar como filtro, medio taponador y transformador para proteger el medio ambiente de la contaminación, especialmente las aguas subterráneas y la cadena alimentaria

3. Servir como medio protector de los numerosos organismos del suelo y como reserva genética
4. Como soporte físico para el desarrollo de las actividades socioeconómicas e infraestructuras
5. Como fuente de materias primas, suministrando agua, arcilla, arena, gravas, minerales y otros
6. Como medio protector de la herencia cultural que contiene en forma de evidencias arqueológicas y paleontológicas

Además de éstas, otras funciones importantes que desempeña el suelo son la fijación de gases de efecto invernadero (secuestro de carbono), la regulación del microclima al absorber la radiación solar e intervenir en la evaporación y el mantenimiento del paisaje.

Por todas estas funciones, es importante dejar claro que el problema fundamental de la erosión es que afecte al suelo y no tanto al **sustrato litológico** (formación de agregados minerales de edad geológica). Muchos son los que hablan de cómo la erosión está destrozando la roca madre de numerosas zonas, sin embargo, esto no tiene que ser el foco fundamental de preocupación, pues no es este sino el suelo, el que soporta los cultivos sobre los que se apoya la vida.

5.1. Factores que influyen en la erosión hídrica

La bibliografía coincide en que la erosión hídrica es un proceso resultante de la interacción entre fenómenos topográficos, climáticos, edáficos, litológicos, biogeográficos y antropogénicos de índole muy variada (Cerdà, 2008; Almorox Alonso et al., 2010; López Bermúdez, 2002) (Figura 2). Así pues, la variabilidad de estos factores hace que existan zonas o regiones más o menos propensas a la erosión, como por ejemplo la región mediterránea o las zonas polares respectivamente.

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

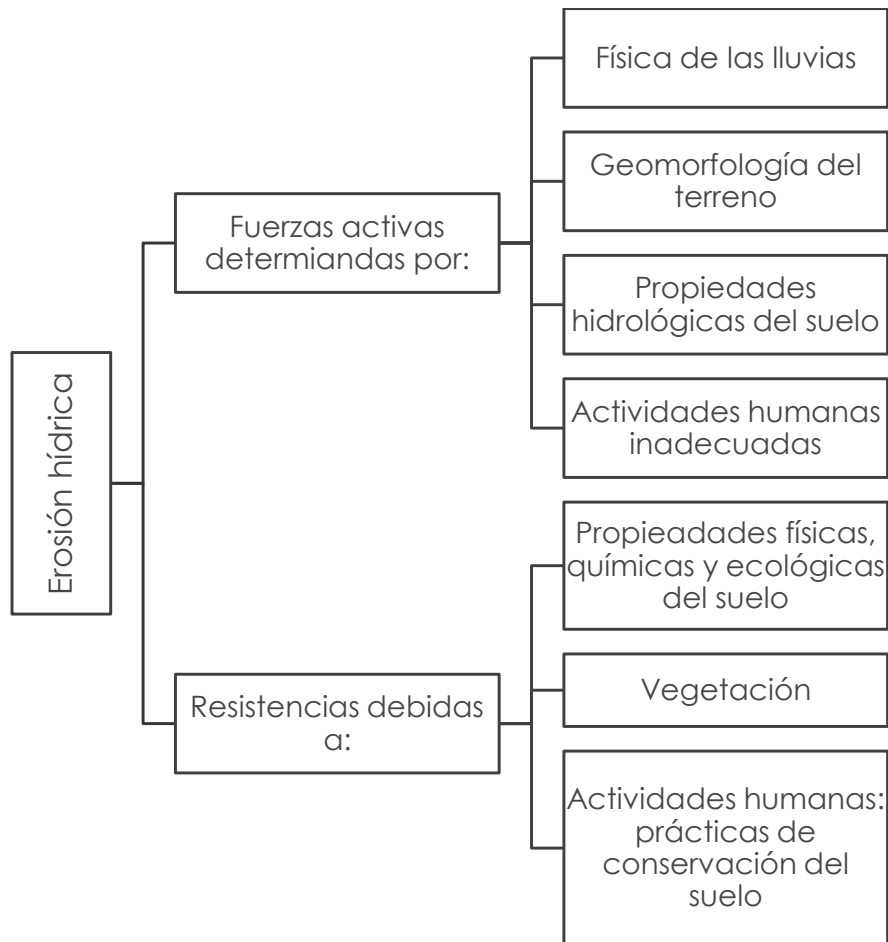


Figura 2.- Principales factores que afectan a la erosión hídrica. Fuente: López Bermúdez, 2002

En cuanto a los **factores climáticos**, los climas más propicios a favorecer el proceso erosivo son aquellos que presentan precipitaciones irregulares, de reiteración aleatoria, prolongadas sequías, procesos tormentosos de gran intensidad (movilización de una gran carga de sedimentos), fuerte evaporación, déficit en el balance de agua y aridez más o menos acusada como consecuencia de lo anterior (Almorox et al. 2010). Las precipitaciones pluviales son las encargadas de iniciar el proceso de erosión hídrica, por lo que aspectos como la intensidad de la lluvia, la energía cinética de las gotas o su tamaño son aspectos fundamentales que influyen en la magnitud del proceso erosivo (López Bermúdez, 2002), siendo mayor cuando más intensas sean las precipitaciones y más tamaño y energía cinética presenten las gotas de lluvia.

Respecto a la **topografía**, el relieve del suelo junto con el ángulo, la longitud y forma de la pendiente son factores primordiales en el proceso erosivo (Tayupanta, 1993). La

erosión hídrica es prácticamente inexistente en zonas llanas, mientras que si el terreno es inclinado (con pendientes entre el 5 y 10%) predominan los desplazamientos hacia las partes más bajas por el efecto de la gravedad. Además, la potencia erosiva del agua escurrida y su capacidad de transporte van en función de la velocidad, la cual aumenta a medida que la pendiente es mayor. En campos de cultivo o en fincas agrícolas en laderas se han observado evidencias de la correlación entre una mayor pendiente y una mayor erosión, sin embargo, algunos autores no han encontrado dichas evidencias o los datos encontrados han mostrado una mayor complejidad del proceso (Almorox Alonso et al. 2010). La forma de la pendiente (uniforme, cóncava, convexa o compleja) también incide en el grado de erosión de los terrenos, produciéndose mayores pérdidas de suelo conforme al grado de inclinación y longitud de la pendiente se incrementa (Tayupanta, 1993).

La longitud de la ladera también es un factor importante, pues se supone que el caudal de escorrentía debe ser mayor a medida que aumenta la distancia a la cumbre, de forma que el fenómeno erosivo es más intenso. No obstante, existe un debate abierto sobre si realmente la longitud de la ladera aumenta la tasa de erosión, pues autores como McCool afirman que *"cuando se presenta deposición, la pérdida de suelo provocada por un flujo laminar de agua por una ladera de pendiente uniforme es independiente de la longitud de la ladera"* (Almorox Alonso et al. 2010).

En cuanto a los **factores edáficos** influyentes en la erosión hídrica, las características físicas y químicas de los suelos tienen una gran importancia en sus procesos de degradación. La erosionabilidad del suelo define la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado y es dependiente de factores como la estructura, materia orgánica, textura, rugosidad superficial, pedregosidad superficial, humedad inicial del suelo, perfil del suelo, temperatura o las prácticas de cultivo entre otros.

La estabilidad de los agregados afecta en gran medida a la erosionabilidad de un suelo, pues si un suelo presenta una buena agregación mantiene cohesionadas sus partículas y porosidad, reduciendo su erosionabilidad. Cuando los agregados se dispersan, las partículas son más erosionables, se taponan los poros y el agua en lugar de infiltrarse, escurre. (Almorox Alonso et al. 2010). De esto se desprende el hecho de que la erosión se presente con mayor intensidad en suelos arenosos y limosos, disminuyendo en los arcillosos. Terrenos con 30-35 % de arcilla son generalmente más coherentes y forman agregados estables que resisten el impacto de las gotas de lluvia

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

y la dispersión de las partículas. Además, estos suelos poseen superficies ásperas que almacenan mucha agua resistiendo así a la erosión laminar, en tanto que las arenas y limos que son de textura más gruesa están más expuestos a la erosión (Tayupanta, 1993).

En cuanto a la **vegetación**, (Cerdà, 2008) afirma que ésta se ha considerado muy tempranamente como el factor que mejor explica la organización espacial de la erosión del suelo pues, evita o reduce la erosión en el caso de que exista una buena cobertura o desencadena los procesos de degradación física y química del suelo en su ausencia. (López Bermúdez, 2002). La cubierta vegetal (tanto aérea como superficial) frena la energía cinética de las gotas de lluvia, reduciendo así su fuerza de impacto contra el suelo y, por tanto, su capacidad para disgregar las partículas y mejorar el suelo físicamente aumentando la cobertura superficial y el contenido en materia orgánica (Tabla 3).

USOS DEL SUELO	Perdida Mg/ha/año	% Superficie ocupada	% Erosión	Relación con el óptimo
Arbolado forestal cc>0.7	0.216	9.12	1.43	1
Pastizal permanente	0.446	4.3	1.39	2.06
Arbolado forestal cc 0.2-0.7	0.452	11.95	3.92	2.09
Regadío	0.615	6.04	2.70	2.85
Arbustos y matorral	0.866	9.9	6.23	4.01
Erial y matorral	1.006	16.36	11.96	4.67
Cultivos herbáceos de secano	1.724	29.88	37.43	7.98
Cultivos arbóreos de secano	4.772	10.07	34.94	22.09

Tabla 3.- Erosión versus usos del suelo. Fuente: Soto, 1990 (Almorox et al. 2010)

Por último, **el hombre y el tiempo** también son dos factores muy importantes ligados al proceso erosivo, pues ambos explican en gran medida las tasas de erosión existentes hoy en día: el hombre por ser el principal agente causante de la desnaturalización del proceso a través de la realización de roturaciones, laboreo, incendios, modificación de cauces o construcción de infraestructuras o minas entre otras actuaciones y el tiempo, porque a lo largo de la historia las condiciones políticas, sociales, económicas...han variado enormemente y han producido fenómenos o movimientos como guerras, el éxodo rural o la sobrepoblación, que están íntimamente relacionados con la mayor o menor erosión.

5.2. Tipos de erosión

De forma general solemos usar el concepto de erosión sin especificar el tipo del que se trata. Fundamentalmente y atendiendo a aspectos como su origen o su agente causante, podemos diferenciar cuatro tipos de erosión principales (Figura 3). De este modo, según su origen distinguimos entre la erosión natural o geológica y la erosión antrópica o acelerada; y según su agente causante entre la erosión hídrica y eólica. No obstante, cabe volver a reseñar que el presente trabajo se centra en la erosión hídrica por ser éste el tipo de erosión más relevante en los ambientes semiáridos, así como por carecer de datos relativos a erosión eólica en Aragón.

La **erosión natural o geológica** es un tipo de erosión producida de forma natural, a través de la lluvia, la nieve o el viento entre otros, sin ningún tipo de intervención humana. En consecuencia, el proceso de erosión es lento y se puede prolongar durante millones de años. Normalmente las tasas de este tipo de erosión suelen ser bajas. Dentro de la erosión natural podríamos incluir la erosión biológica, la cual hace referencia a la degradación del suelo causada por, por ejemplo, el impacto de las pisadas de los animales sobre el suelo que, en el caso de que constituyeran un rebaño de una explotación ganadera ya no supondrían un proceso de erosión natural, sino acelerada.

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

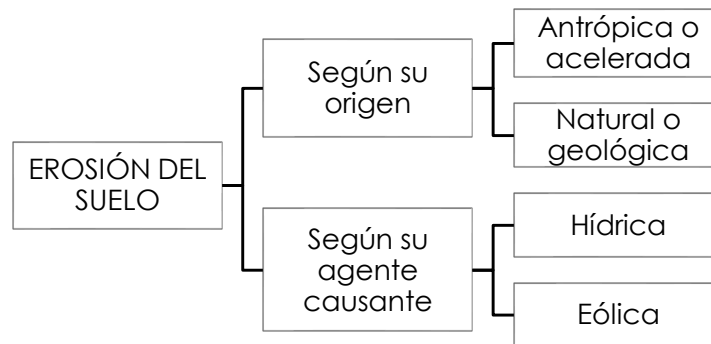


Figura 3.- Tipos de erosión de suelo, según origen y agente causante. Fuente:

Almorox Alonso et., al (2010)

La **erosión antrópica o acelerada** se produce cuando el hombre altera los “procesos naturales” a través de la puesta en marcha de diferentes prácticas y tecnologías. Por el contrario, las tasas de este tipo de erosión suelen ser elevadas y pueden desencadenar en muchos casos procesos de desertificación.

La **erosión hídrica** es un tipo de erosión en la cual los procesos de remoción del suelo y transporte son efectuados por el agua (Almorox et al., 2010). Entre todas las formas de erosión, la provocada por el impacto de las gotas de lluvia y la remoción arrastre de sedimento por la escorrentía superficial (erosión hídrica) es la que más ha atraído la atención de científicos y técnicos (García Ruíz y López Bermúdez, 2001) pues, podemos afirmar que este tipo de erosión es el dominante y más importante en los ambientes del entorno semiárido. Los procesos más relevantes de la erosión hídrica son la erosión por salpicadura, laminar en regueros o surcos y la erosión en cárcavas y barrancos (Navas, 1995):

- La **erosión laminar o entre regueros** está producida por el impacto de las gotas de lluvia en el suelo y por el transporte del suelo disgregado por un flujo superficial poco profundo y homogéneo.
- La **erosión en regueros o surcos** se produce cuando el flujo suelo-agua escurre concentrado en corrientes capaces de abrir pequeños surcos, favorecidos por las irregularidades y rugosidades del terreno.
- La **erosión en cárcavas y barrancos** hace referencia a cauces con grandes pendientes y encajados, altas tasas de erosión en materiales finos y escasa ratio anchura-profundidad. Suelen originar complejas redes de drenaje y a diferencia de los regueros, éstos no desaparecen con la remoción del suelo por la maquinaria agrícola.

La **erosión eólica** es el proceso de disgregación, remoción y transporte de las partículas del suelo por la acción del viento. Este fenómeno se ve favorecido con: vientos fuertes y frecuentes; superficies llanas expuestas al viento; suelo seco, suelto, de textura fina y poca materia orgánica; una inexistente o degradada estructura del suelo; condiciones de aridez (escasas precipitaciones y elevadas temperaturas) y una escasa cubierta vegetal (así un pastoreo abusivo, la quema residuos agrícolas y el laboreo irracional pueden ser factores causantes de la erosión eólica) (Almorox Alonso et al. 2010).

5.3. Métodos y técnicas para el estudio de la erosión (valores tn/ha/año)

Para la estimación de la erosión hídrica, (Almorox Alonso et., al 2010) realizan una diferenciación bastante precisa de los métodos o modelos, distinguiendo entre dos **tipos de métodos** o modelos fundamentales: los **cualitativos**, que se basan en la definición de unidades homogéneas a través de cartografía y a partir de los principales parámetros que controlan en proceso erosivo y los **cuantitativos**, que permiten obtener un valor numérico de erosión y distinguir las formas y los grados de erosión. Los métodos cuantitativos pueden dividirse en **métodos de estimación directa** y **métodos de estimación indirecta**, dentro de los cuales podemos diferenciar los **estadísticos** (regresión), los **empíricos** (paramétricos) y los **conceptuales con base física**. (Almorox Alonso et al., 2010) (Figura 4).

Las formulaciones con base física explicitan los procesos mediante ecuaciones que tienen en cuenta las leyes físicas que gobiernan la generación; los modelos conceptuales se basan en general en la representación de la cuenca vertiente y sus procesos de transferencia y almacenamiento; los métodos paramétricos/empíricos con formulaciones empíricas que pretenden interpretar los mecanismos erosivos con sus causas y efectos y los métodos estadísticos relacionan mediante el análisis de regresión mediciones de degradación específica con parámetros asociados al proceso erosivo (Almorox et al. 2010).

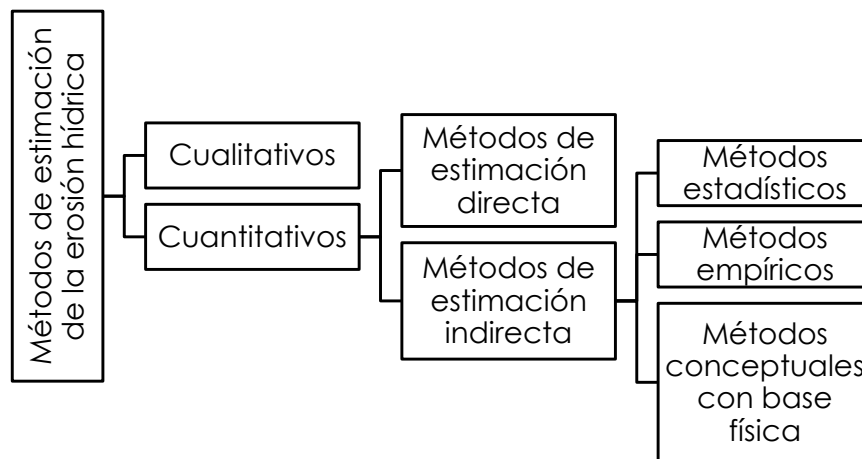


Figura 4.- Tipología de métodos de estimación de la erosión hídrica. Fuente: Almorox Alonso et. al (2010)

La aplicación de unos u otros modelos y técnicas varía según las características del terreno, los objetivos del proyecto a realizar y de los recursos económicos de los que se disponga. No obstante, el tiempo también ha influido en la aplicación de los modelos y técnicas, pues se ha ido evolucionando desde los modelos más sencillos de estimación como la fórmula de Fournier (1960) o la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Wischmeier & Smith, 1965) a métodos y técnicas mucho más complejos y sofisticados que requieren de la utilización de Sistemas de Información Geográfica, de teledetección y de análisis estadísticos multivariados entre otros (García Ruiz y López Bermúdez, 2009). Sin embargo, cabe señalar que, la inexistencia de un límite claro entre los distintos modelos de estimación de la erosión hídrica hace que sea común la combinación de éstos entre sí (García Ruiz y López Bermúdez, 2009).

Dentro de cada tipo de método de estimación, encontramos una variedad más o menos extensa de modelos. Así pues, a continuación, y basándonos en la clasificación realizada por Almorox Alonso et al. (2010) las características fundamentales de los principales modelos de cada método de estimación son:

- Dentro de los **métodos cualitativos** hay que destacar el modelo cualitativo de erosión-deposición para suelos cultivados y el programa Corine.
 - El **modelo cualitativo de erosión-deposición para suelos cultivados** se apoya en el hecho de que en suelos cultivados la erosión es más activa que la edafización, lo que supone *una desaparición progresiva de los horizontes superficiales del perfil en la parte alta de las laderas y su acumulación, al menos parcial, en la base, acentuándose este proceso*

en las laderas con una pendiente más pronunciada. Así pues, la erosión en estas zonas se manifiesta en forma de zonas de acumulación y regueros de tipo *rill*, dado que éstos no son permanentes y desaparecen con la siguiente labor, anulando los efectos de la erosión por arroyada. A partir de este modelo se establecen una serie de grados de erosión a partir de los cuales se realiza una primera estimación de la erosión existente y su distribución espacial. El grado de erosión pueden ser nulo, ligero, moderado, severo y extremo.

- En segundo lugar, dentro del **programa Corine** (2000), que tiene como objetivo fundamental la captura de datos de tipo numérico y geográfico, para la creación de una base de datos europea a escala 1:100.000 sobre la cobertura y uso del territorio, mediante la interpretación a través de imágenes recogidas por la serie de satélites LandSat y SPOT, se incluye el proyecto "Riesgos de erosión de suelos y evaluación de tierras", a través del cual se *pretende crear un sistema de información sobre el estado del medio y de los recursos naturales en los estados de la Unión Europea*. Su aplicación para la estimación de la erosión hídrica se realiza a través del índice de erosión real (ASER) que muestra la erosión en las condiciones actuales de uso del suelo y de cobertura vegetal y el índice de riesgo de erosión potencial, que indica la susceptibilidad de los terrenos a la erosión, considerando los factores suelo, clima y topografía. El objetivo último de este modelo es la definición de áreas con elevado riesgo de erosión, necesitadas de prácticas encaminadas a su control y la definición de áreas de bajo riesgo de erosión en las que no son necesarias medidas específicas de conservación.
- Dentro de los **métodos cuantitativos** encontramos una gran variedad de **modelos de evaluación directa**, como son los transectos geomorfológicos, las piquetas y perfiladores microtopográficos, las parcelas y estaciones experimentales, los simuladores de lluvia, las cuencas experimentales, la batimetría de embalses, la técnica del Cesio 137 o los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección entre otros.

- Los **transectos geomorfológicos** constituyen una técnica descriptiva, sencilla y laboriosa en campo, que informa sobre el predominio de determinados procesos. La técnica consiste en, una vez definidos previamente diferentes microambientes erosivos a partir de las observaciones en terreno, colocar una cinta métrica sobre la superficie del suelo, en sentido transversal a la línea de máxima pendiente, para medir con ella la longitud que ocupan los microambientes geomorfológicos cortados por la cinta. El resultado informa, mediante porcentajes de frecuencia, de la importancia de cada microambiente en el espacio y permite comparar laderas con distinta pendiente, vegetación, forma o exposición.
- Las **piquetas y perfiladores microtopográficos** por su parte, tienen por objeto obtener información sobre las variaciones que, a escala de detalle, experimenta la superficie del terreno debido a la erosión y sedimentación. Una vez pasados varios años de medición, el resultado final permite reconstruir la evolución de un sector de la ladera y calcular volumétricamente las pérdidas por erosión.

Las piquetas, junto con las agujas de erosión, las varillas o clavos constituyen la técnica más elemental para medir la erosión; esta consiste en clavar el agua de 30 a 60 cm de longitud en el suelo, en una roca blanda o un depósito no consolidado. Dado que una parte de la aguja queda visible al exterior, ésta se emplea para medir periódicamente la diferencia de altura entre su extremo y la superficie del suelo. La diferencia que exista entre el extremo de la aguja y la superficie del suelo es lo que permite deducir la existencia de procesos de erosión y acumulación.

- Las **parcelas experimentales** son conocidas por ser el apoyo fundamental en el que se basó la formulación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Esta ecuación se basó en los datos obtenidos de las más de 1000 parcelas experimentales distribuidas por el territorio de los Estados Unidos. Pese a que estas parcelas contaban con unas características concretas tanto de tamaño y pendiente (una longitud de 22.13 metros, un ancho de 1.83 metros y sobre una pendiente uniforme de 9% en sentido longitudinal), hoy en día el tamaño de las

parcelas varía enormemente según los objetivos del proyecto a realizar. Además, las parcelas experimentales pueden ser de tipo abierto o cerrado; en las parcelas de tipo abierto los límites se realizan mediante elementos naturales y la técnica consiste en la colocación de uno o varios colectores que recogen la escorrentía y sedimento generados en una ladera, mientras que en las parcelas de tipo cerrado están delimitadas por límites artificiales y siguen el esquema de Wischmeier, aunque pueden presentar como ya se ha dicho tamaños variables, de los cuales dependerán en gran medida los datos obtenidos, que en ninguna circunstancia podrán interpretarse como absolutos extrapolables.

- Los **simuladores de lluvia** también varían en función de los medios y objetivos propuestos. El proceso consiste en la simulación del proceso de lluvia con intensidades conocidas y variables, lo que permite aumentar la precisión sobre las medidas. Este método permite estudiar la erosión producida por la escorrentía y la erosión producida por salpicadura y, además, aporta interesantes aspectos hidromorfológicos como la propensión del suelo a ser removido por *splash*, la capacidad de infiltración o la mayor o menor tendencia a generar escorrentía, así como su velocidad de generación. No obstante, las conclusiones y datos obtenidos mediante este método no deben ser extrapolados a condiciones del terreno diferentes a las que se ha realizado el experimento.
- Las **cuenca experimentales** son un método que va más allá de los simuladores de lluvia o las parcelas experimentales, pues ofrecen la posibilidad de trabajar con una escala más amplia y en un espacio sin fronteras artificiales o arbitrarias establecidas. Este último aspecto permite realizar las investigaciones en unas condiciones mucho más naturales, obtener unos datos bastante más ajustados a la realidad y poder abordar problemas mucho más complejos.
- **Batimetría de embalses.** Los embalses son importantes depósitos de sedimentos, los cuales van mermando progresivamente su capacidad afectando a una gran diversidad de actividades humanas. No obstante, los depósitos de sedimento de los embalses recogen

información geomorfológica muy interesante, pues son la consecuencia de la actividad erosiva producida en toda la cuenca, así como del transporte de la red fluvial. Para conocer el volumen aterrado de sedimentos y poder calcular la "degradación específica" (*cantidad total de sedimento procedente de la erosión y el transporte en una cuenca fluvial*) (García Ruíz y López Bermúdez, 2009) es necesario la utilización de dos tipos de técnicas: fotogramétricas y batimétricas. Las primeras facilitan el conocimiento del perfil topográfico de la parte no sumergida en ese momento por el agua del embalse y las segundas, permiten realizar el levantamiento topográfico de la zona del embalse sumergida. Así pues, el objetivo es obtener la densidad de sedimento aterrado y pasar el volumen a peso para así poder calcular la degradación específica.

- En cuanto a la **técnica del Cesio 137**, el Cesio fue producido durante los ensayos nucleares del pasado siglo (1950 y 1960) y liberado en los conocidos accidentes de Chernóbil y Fukushima. Este radioisótopo se expandió por la atmosfera de tal manera que, posteriormente y a través de las gotas de lluvia quedó depositado en el suelo de la superficie terrestre, fijándose a las partículas de la tierra sin poder ser ni arrastrado ni absorbido por las plantas. Es por esto por lo que se utiliza este elemento para medir la erosión y la redistribución del suelo, analizando el contenido de Cesio a través de la espectrometría gamma. Dadas las dificultades asociadas con las técnicas clásicas de medida de la erosión, Ana Navas fue una de las primeras investigadoras que decidió usar este método en sus estudios realizados en el valle del Ebro a través de la estación experimental Aula Dei del CSIC. Según Navas (1995) el potencial de utilización de la técnica del Cesio 137 en los ambientes semiáridos está probado y entre otras cosas, esta técnica ofrece las siguientes ventajas:
 - La velocidad de erosión estimada es la suma de todos los procesos erosivos y representa un promedio de los últimos 30-35 años

- Suministra una medida cuantitativa tanto de la distribución como de la velocidad de erosión del suelo, y de la proporción de suelo erosionado que es transportado fuera del área estudiada
- El área de investigación es estudiada sin alterar el ambiente y solo se quiere una visita al lugar de estudio
- Puede ser utilizada para la validación y formulación de modelos de erosión

o **Métodos cuantitativos de evaluación indirecta**

La **USLE** (*Universal Soil Loss Equation*), denominado en su última modificación **RUSLE** (*Revised Universal Soil Loss Equation*), es un modelo paramétrico conocido por ser uno de los métodos más aceptados y aplicados para la predicción de la pérdida de suelo debido a su sencillez. Fue creada en 1962 por Wischmeier y Smith a partir de una gran cantidad de experiencias y formulaciones anteriores como las de Zingg, Musgrave o Smith, con el objetivo de estimar las pérdidas de suelo producidas a largo plazo por la acción de la erosión laminar y en regueros en una parcela o superficie de terreno regueros ante unas determinadas condiciones de clima, suelo, vegetación, relieve y usos de suelo (Tánago, 1991).

Los beneficios de esta fórmula no solo residen en su universalidad, pues esta ecuación también es muy adecuada para:

- Predecir la pérdida anual de suelo de una pendiente en un campo con condiciones específicas para el uso de la tierra
- Servir como guía en la selección de sistemas de cultivo y manejo y de prácticas de conservación para suelos y pendientes específicos
- Predecir el cambio en la pérdida de suelo que resultaría de un cambio en las cosechas de conservación sobre un campo específico
- Determinar cómo pueden aplicarse o alterarse las prácticas de conservación para permitir un cultivo más intensivo
- Estimar las pérdidas de suelo en áreas con un uso de suelo distinto del agrícola
- Obtener estimaciones de pérdidas de suelo para que los conservacionistas determinen las necesidades de conservación (Kirkby & Morgan, 1991)

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

- Identificar las zonas en las que se genera mayor cantidad de sedimentos (a través de los valores A_i de áreas homogéneas en cuanto a los factores que provocan la erosión de suelo (R, K, LS, C, y P) comentados a continuación.
- Identificar las causas por las que se producen las pérdidas de suelos (a través de los valores de R, K, LS, C y P de cada área homogénea)
- Implantar las medidas de conservación más adecuadas para reducir las pérdidas de suelo por erosión hídrica laminar y entre-regueros.

En cuanto a su expresión, la ecuación de la USLE se materializa en la siguiente fórmula:

$$A = (0.224) RKLSCP$$

- A: pérdida de suelo expresada en $\text{kg/m}^2\text{s}$
- R: factor de erosividad por la lluvia
- K: factor de erodibilidad del suelo
- L: el factor de longitud de la pendiente
- S: el factor de gradiente de pendiente
- C: el factor de manejo de cosechas
- P: factor del método de control de erosión

Estos factores se desarrollaron mediante una unidad de evaluación llamada “parcela estándar”, la cual contaba con una longitud de 22.13 m y se disponía sobre una pendiente uniforme de 9 % en sentido longitudinal.

- **Factor R (erosividad por la precipitación de lluvia):** Este factor hace referencia a la capacidad de la lluvia para generar erosión sobre el suelo, la cual está marcada por dos características de la lluvia tempestuosa: la energía cinética y la intensidad máxima durante 30 minutos. Según análisis de regresión, las pérdidas de suelo por tormentas en las parcelas cultivadas bajo barbecho continuo están altamente correlacionadas con los productos combinados de la energía cinética total y la intensidad máxima de la precipitación durante 30 minutos (Kirkby y Morgan, 1984).
- **Factor K (erosividad del suelo):** Hace referencia a la susceptibilidad que tiene un suelo de ser erosionado, por lo que este factor depende de las características edáficas que presente el suelo, tales como la textura, la

estructura o la pedregosidad entre otras. Por tanto, este factor refleja el hecho de que diferentes suelos se erosionan a diferentes tasas cuando los demás factores que afectan la erosión son distintos (Kirkby y Morgan, 1984).

- **Factor L (longitud de pendiente) y Factor S (gradiente de pendiente):** Se evalúa como un único factor topográfico. La longitud define la distancia desde el punto de origen del flujo sobre la superficie hasta el punto donde la pendiente disminuye lo bastante como para que ocurra la deposición o hasta el punto en que la escorrentía entra en un canal definido. El gradiente de pendiente es el campo o segmento de pendiente, expresado generalmente como un porcentaje. El uso del factor topográfico LS, suele subestimar la pérdida en las pendientes cóncavas y subestimar la pérdida en las convexas.
- **Factor C (manejo de cultivos):** Representa la relación de pérdida del suelo a partir de una condición específica de cultivo o cobertura con la pérdida del suelo a partir de un estado de labranza y barbecho continuo para el mismo suelo, pendiente y precipitación pluvial (Kirkby y Morgan, 1984).
La vegetación es un factor relevante en la erosión, la cobertura vegetal reduce la energía de la lluvia al interceptarla y evita que caiga directamente al suelo (Almorox et al. 2010).

Para la correcta aplicación y utilidad de la USLE, los valores otorgados a esta serie de factores deben representar lo más fielmente posible las condiciones del territorio, por lo que esta tarea será más importante y laboriosa que la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en sí misma. No obstante, cabe señalar que, tras la observación de distintos datos y cartografías obtenidos a partir de la USLE, se aprecia un sobredimensionamiento de las tasas de erosión. Hay zonas que, de contar con las tasas de erosión indicadas, tendrían problemas tan graves en el suelo que les impedirían llevar a cabo las actividades que aun hoy en día siguen realizando.

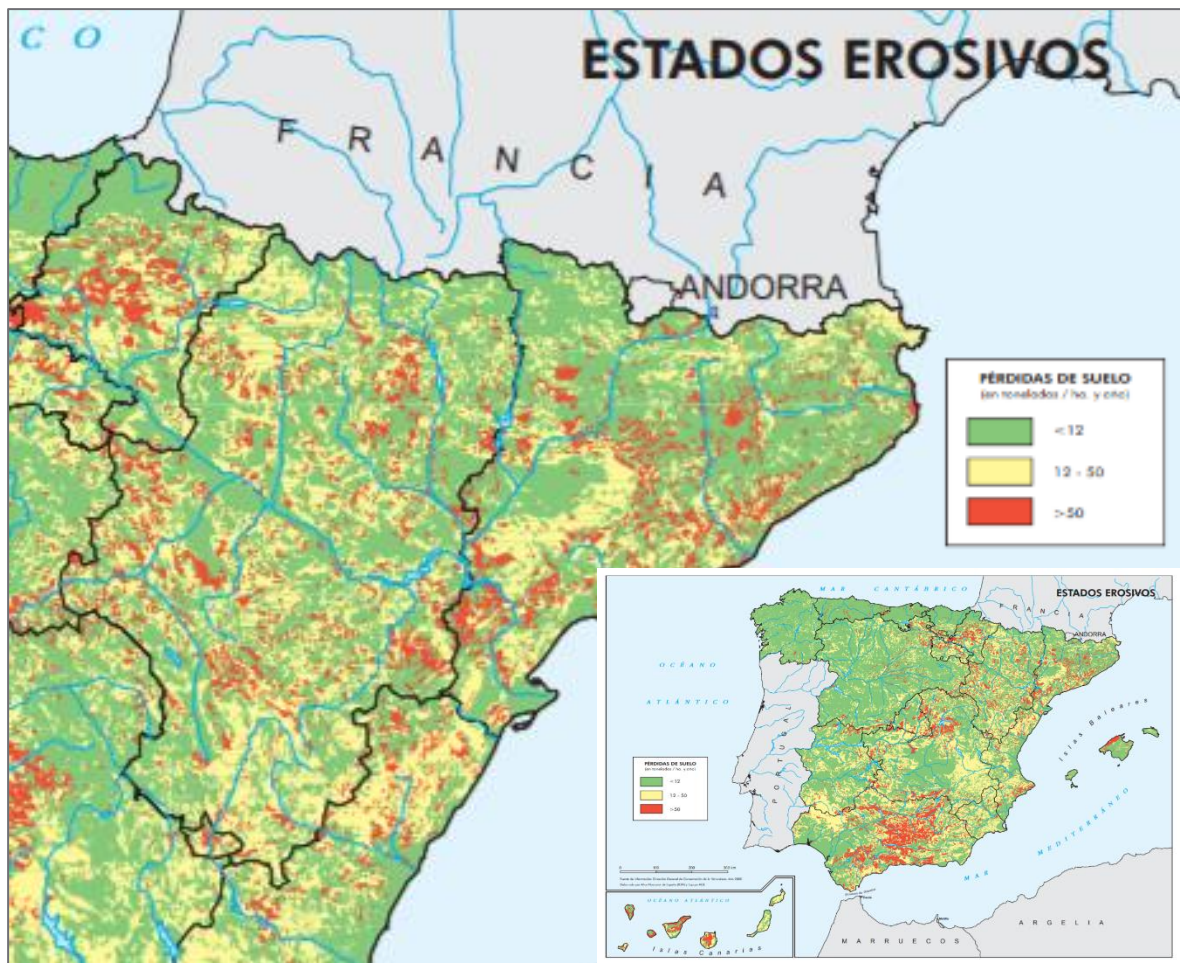


Figura 5.- Mapa de pérdidas de suelo en Aragón y España. Fuente: IGN (2000)

Pese a ser uno de los modelos más aceptados y aplicados tal y como se ha comentado para evaluar las pérdidas de suelo, a medida que se ha ido avanzando en el estudio de las tasas de erosión se han descubierto algunas limitaciones de la USLE. Entre estas, (García-Ruiz y López-Bermúdez, 2009) destacan la sobreestimación de los datos a escala de cueca, la no consideración de la sedimentación a lo largo de la ladera, así como tampoco los almacenes temporales de sedimento que pueden llegar a acumularse cuando la pendiente cesa, y el hecho de que sólo mide la erosión por arroyada superficial en regueros (rills) y no en cárcavas y barrancos.

La **Ecuación de Pérdida de Suelo Revisada o RUSLE** (*Revised Universal Soil Loss Equation: Wissmeyer y Foster, 1983*) se desarrolló con el objetivo de superar las limitaciones con las que contaba la USLE. Según un informe sobre la predicción de la erosión de suelos realizado por la FAO, algunos de los avances que supuso esta ecuación revisada son los siguientes (E. Roose, 1996):

- Computarización de algoritmos para facilitar los cálculos

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

- Nuevos valores de erosividad de lluvias-escorrentía (R) en el oeste de los Estados Unidos (condiciones áridas), basado en más de 1.200 localidades
- Desarrollo de un término de susceptibilidad del suelo a la erosión estacionalmente variable (K) y métodos alternativos de estimación de K cuando el nomograma no es aplicable
- Un nuevo método para calcular el factor cubierta-manejo (C), utilizando subfactores que incluyen uso previo de la tierra, cubierta de cultivos, cubierta vegetal del suelo (incluyendo fragmentos de roca en la superficie), y rugosidad del terreno
- Nuevas formas de estimar los factores de largo y magnitud de la pendiente (LS) que consideran porcentajes de erosión en surcos e íter-surcos
- La capacidad de ajustar el LS para pendientes de forma variable
- Nuevos valores de prácticas de conservación (P) para cultivo en fajas alternadas, uso de drenaje subterráneo y praderas

Pese a estos avances, cabe destacar que, al igual que la USLE, esta ecuación no logró superar la limitación fundamental que presentaba su antecesora, pues tampoco es adecuada para la estimación de rendimientos de sedimentos en pendientes complejas o grandes cuencas.

6. Procesos erosivos en el medio morfoclimático semiárido aragonés

6.1. Condiciones semiáridas del territorio aragonés

Pese a ser dificultosa la delimitación precisa entre zonas semiáridas, áridas e hiperáridas, debido a la gran variabilidad interanual de las precipitaciones y al hecho de que el tránsito entre unas zonas y otras es paulatino (Gutiérrez Elorza, 2001), es preciso centrarse detenidamente en el problema común que todas ellas comparten: la fragilidad del equilibrio de los ecosistemas y la permanente amenaza de la desertización.

Aunque Aragón cuenta con una originalidad climática caracterizada por albergar una gran variedad de ambientes muy diversos que van desde la extrema aridez de las tierras centrales del Ebro a las nieves permanentes del Pirineo central, de forma general, es una de las comunidades autónomas españolas que se localizan dentro del contexto semiárido mundial (Figura 5), pues pese a contar con zonas húmedas y subhúmedas, la mayor parte del territorio se encuentra en valores semiáridos. No obstante, cabe destacar entre las tierras aragonesas la zona del Valle del Ebro dado su reconocimiento como uno de los principales biomas semiáridos del mundo. De este modo, el primer factor limitante de Aragón como zona semiárida es la aridez y, como consecuencia, la disponibilidad hídrica

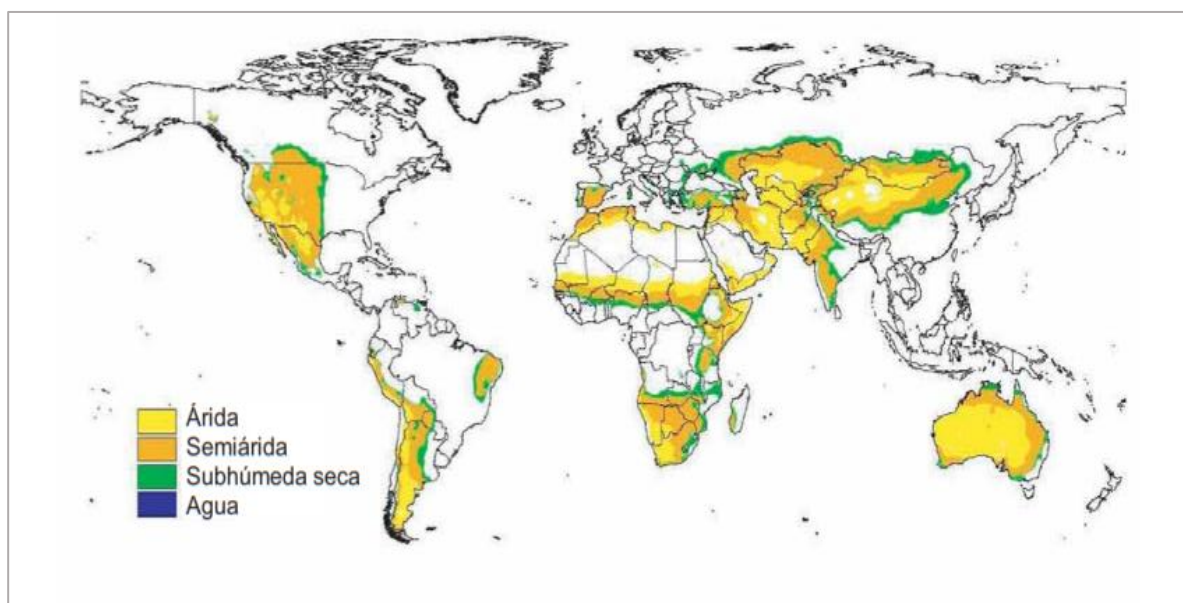


Figura 6.- Mapa de la distribución de las tierras áridas del mundo. Fuente: FAO, 2002

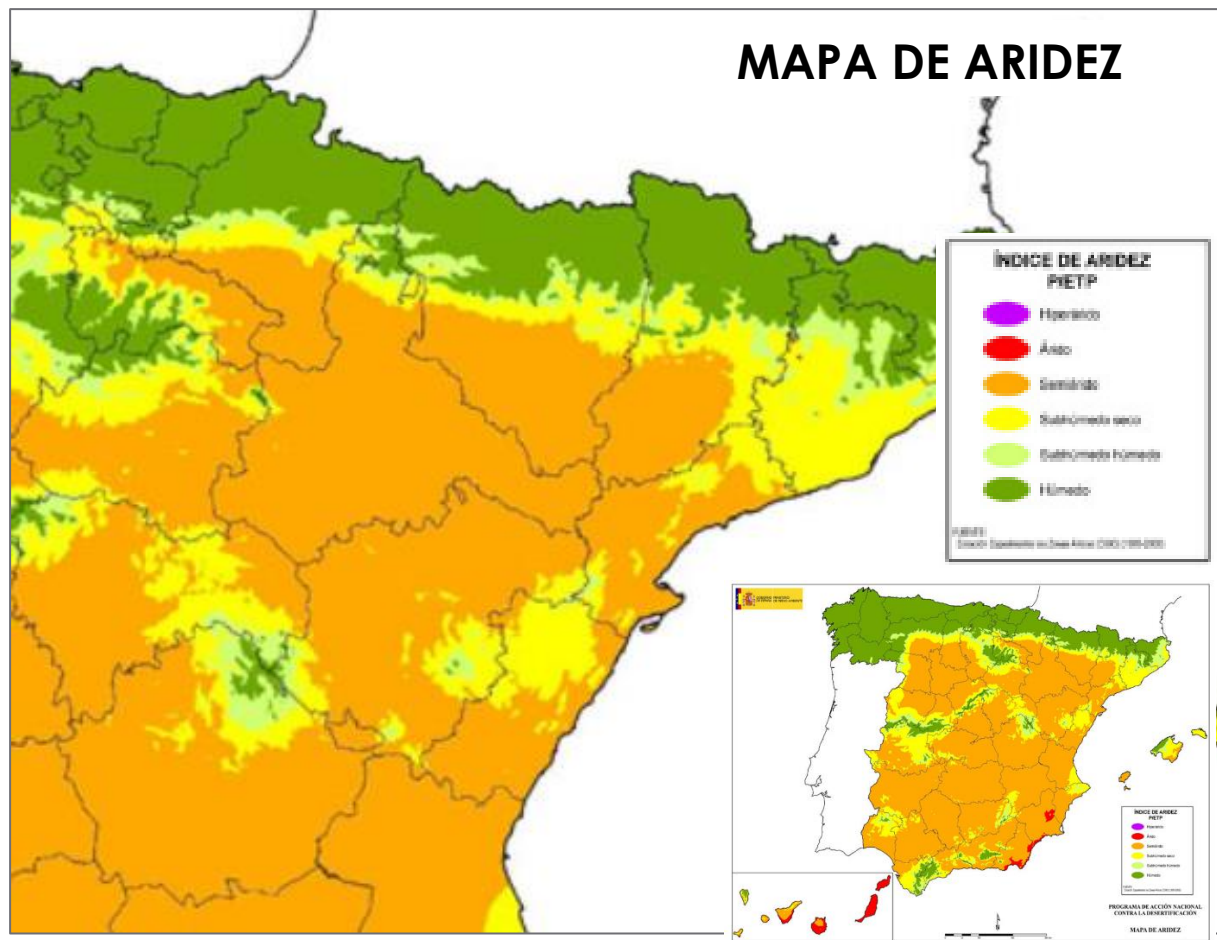


Figura 7.- Mapa de aridez de España. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPAMA). Enlace: https://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/desertificacion-restauracion-forestal/lucha-contra-la-desertificacion/lch_espana.aspx

Sin embargo, algunas preguntas que pueden desprenderse de lo anterior son ¿a qué nos referimos exactamente con aridez? ¿qué características específicas presentan las áreas semiáridas?

Es difícil una definición breve del término aridez ya que con frecuencia no nos referimos al aspecto climatológico, sino que aducimos también ciertas condiciones edáficas (F. Geiger, 1973). La **aridez** podría definirse como el estado que se genera cuando las temperaturas son elevadas y, por tanto, la evapotranspiración potencial, lo que afecta negativamente al suelo y a la capa atmosférica que se encuentra en contacto con este, desprovisionándolos de humedad. Según (Gutiérrez Elorza, 2001) está controlada por un conjunto de factores climáticos, orográficos y oceanográficos de tal manera que:

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

- Los anticiclones subtropicales generan unas condiciones de estabilidad de las masas de aire que impiden que éste ascienda y que sea seco y subsidente
- En las latitudes medias del Hemisferio Norte, las características climáticas desprendidas de la continentalidad, tales como la escasa influencia marítima o la fuerte oscilación térmica diaria y anual también favorecen la aridez
- El efecto orográfico que realizan las barreras montañosas que frenan la entrada de vientos húmedos, también aumentan el riesgo a la generación de aridez en los territorios aislados
- En cuanto a las corrientes oceánicas frías, como la de Humboldt o Benguela, las masas de aire condensan el vapor de agua sobre éstas formando nieblas y brumas costeras que, se calientan al llegar a la costa, alejándose del punto de saturación (Gutiérrez Elorza, 2001)

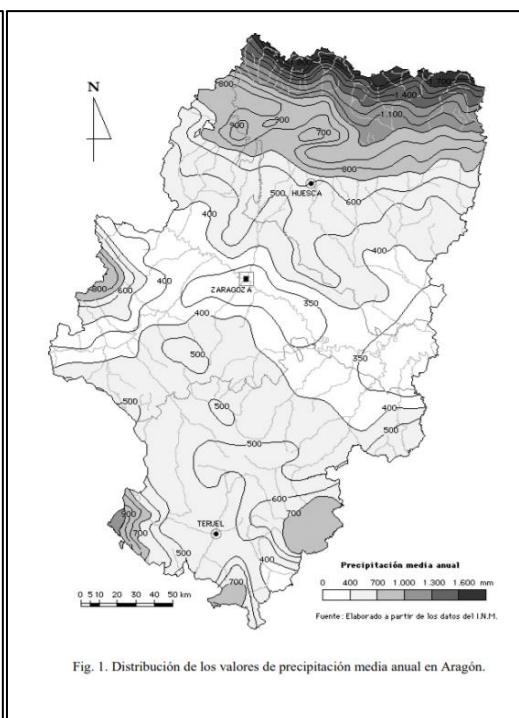
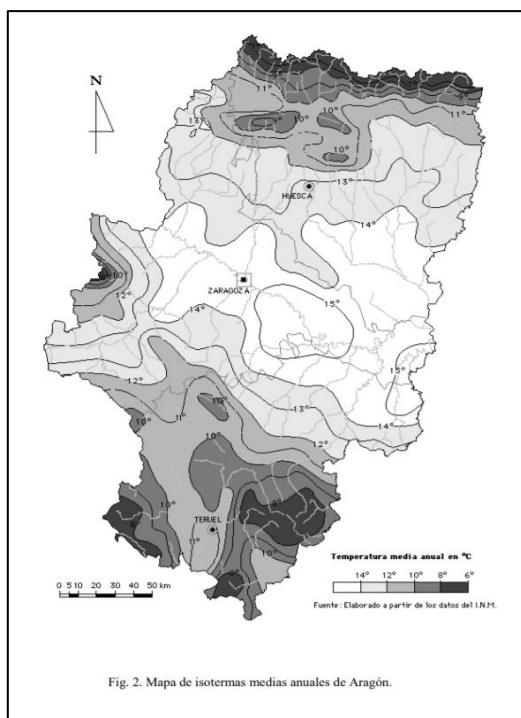
En el caso de las características de las zonas semiáridas, a continuación se muestra una tabla en la que se especifican las características generales de éstas zonas, las cuales, posteriormente se comentarán más detenidamente aplicándolas al contexto aragonés.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ZONAS SEMIÁRIDAS	
Características ambientales	<ul style="list-style-type: none">- Ratio precipitación media anual y EVP inferior a 0.65- Disponibilidad hídrica como principal factor limitante para el desarrollo biológico- Demanda evaporativa muy elevada que depende de la radiación solar, la presión del vapor de agua y la velocidad del viento- Régimen de precipitaciones muy irregular espacial y temporalmente con intensos y cortos eventos de lluvia estacionales- El espesor de la zona no saturada puede ser de varios cientos de metros- Variación mayor de los flujos y contenidos de agua- Altos niveles de radiación solar- Elevada amplitud térmica diaria- Fuertes vientos- Altas tasas de arrastre de sedimentos

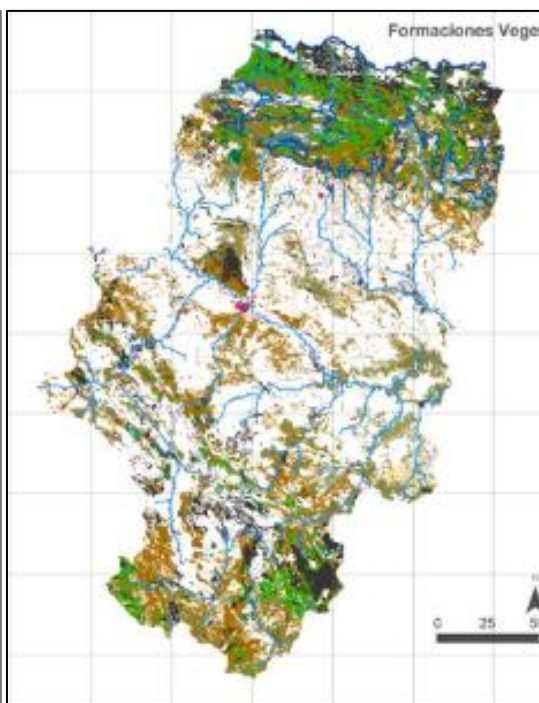
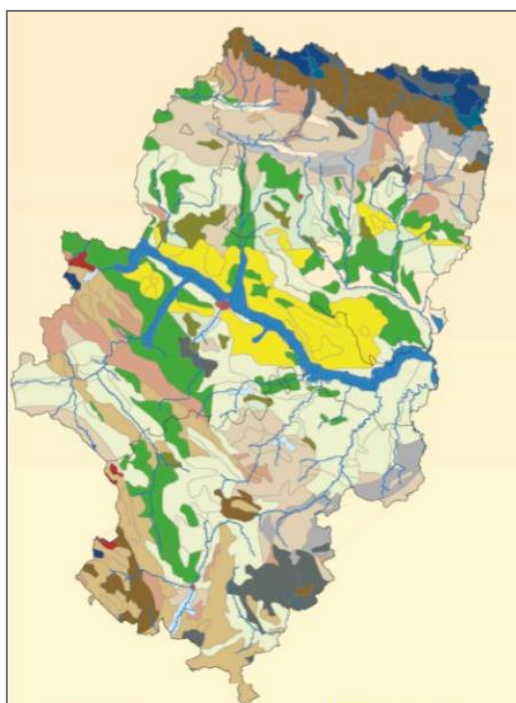
	<ul style="list-style-type: none"> - Importantes pérdidas de agua por infiltración en canales aluviales (Fernández, Gálvez, Jesús)
Características edáficas	<ul style="list-style-type: none"> - Gran variabilidad de la profundidad, el pH y la fertilidad de los suelos - Textura de los suelos muy variable - Presencia de suelos con perfiles poco desarrollados, caracterizados por la acumulación de sales solubles en el perfil - Presencia de un horizonte cálcico formado por la acumulación de carbonato - Productividad de los suelos ligada a su capacidad para retener agua - Suelos con bajo contenido en materia orgánica y una baja estabilidad de los agregados del suelos - Suelos con bajas tasas de infiltración - Elevada escorrentía superficial - Escasa vegetación - Vulnerabilidad de los suelos al impacto de las gotas de lluvia - Suelos vulnerables a la erosión y a la pérdida de nutrientes (Fernández, Gálvez, Jesús)
Vegetación	<ul style="list-style-type: none"> - Vegetación escasa o incluso inexistente - Vegetación dependiente fundamentalmente de las precipitaciones - Precipitaciones en torno a los 100 y 500 mm dan lugar una vegetación de tipo arbórea o de arbustos y hierbas, la cual de forma general es una etapa de degradación por la intervención humana

Características geomorfológicas	<ul style="list-style-type: none"> - Procesos ligados a: <ul style="list-style-type: none"> - La carencia de recursos hídricos - La escasa o degradada cobertura vegetal - los suelos muy reducidos - Procesos dominantes: <ul style="list-style-type: none"> - Procesos de humectación y secado - Procesos de meteorización salina - Procesos de erosión hídrica - Cambios en los canales - Inundaciones - Actividad eólica
Características erosivas (erosión hídrica)	<ul style="list-style-type: none"> - Erosión hídrica producida fundamentalmente por: <ul style="list-style-type: none"> - El impacto y salpicadura producidos por las gotas de lluvia - El flujo superficial - Las interacciones entre ambos - Suelos susceptibles a la erosión hídrica debido a: <ul style="list-style-type: none"> - El tamaño de las partículas del suelo - La estabilidad estructural del suelo - El <i>crusting</i> - Los usos de suelo y los sistemas de cultivo - Procesos característicos: <ul style="list-style-type: none"> - Formación de cárcavas o <i>badnals</i> en litologías arcillo-margosas y en estructuras agrarias realizadas por el hombre, desencadenados muchas veces por prácticas inadecuadas de deforestación y por sobrepastoreo - Procesos de <i>piping</i> en terrenos de cárcavas de escaso valor agrícola, desencadenados muchas veces por prácticas inadecuadas de deforestación y por sobrepastoreo, que pueden dar lugar a deslizamientos y subsidencias

Tabla 4.- Características ambientales y edáficas de las zonas semiáridas. Fuentes: Fernández Gálvez, Jesús y Gutiérrez Elorza 2001)



Figuras 8 y 9.- Distribución de la temperatura media anual en Aragón y Distribución de los valores de precipitación media anual en Aragón. Fuente: Cuadrat Prats, 2004



Figuras 10 y 11. -Distribución de los suelos y la vegetación actual de Aragón. Fuentes: Badía et al. (2007) y Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza

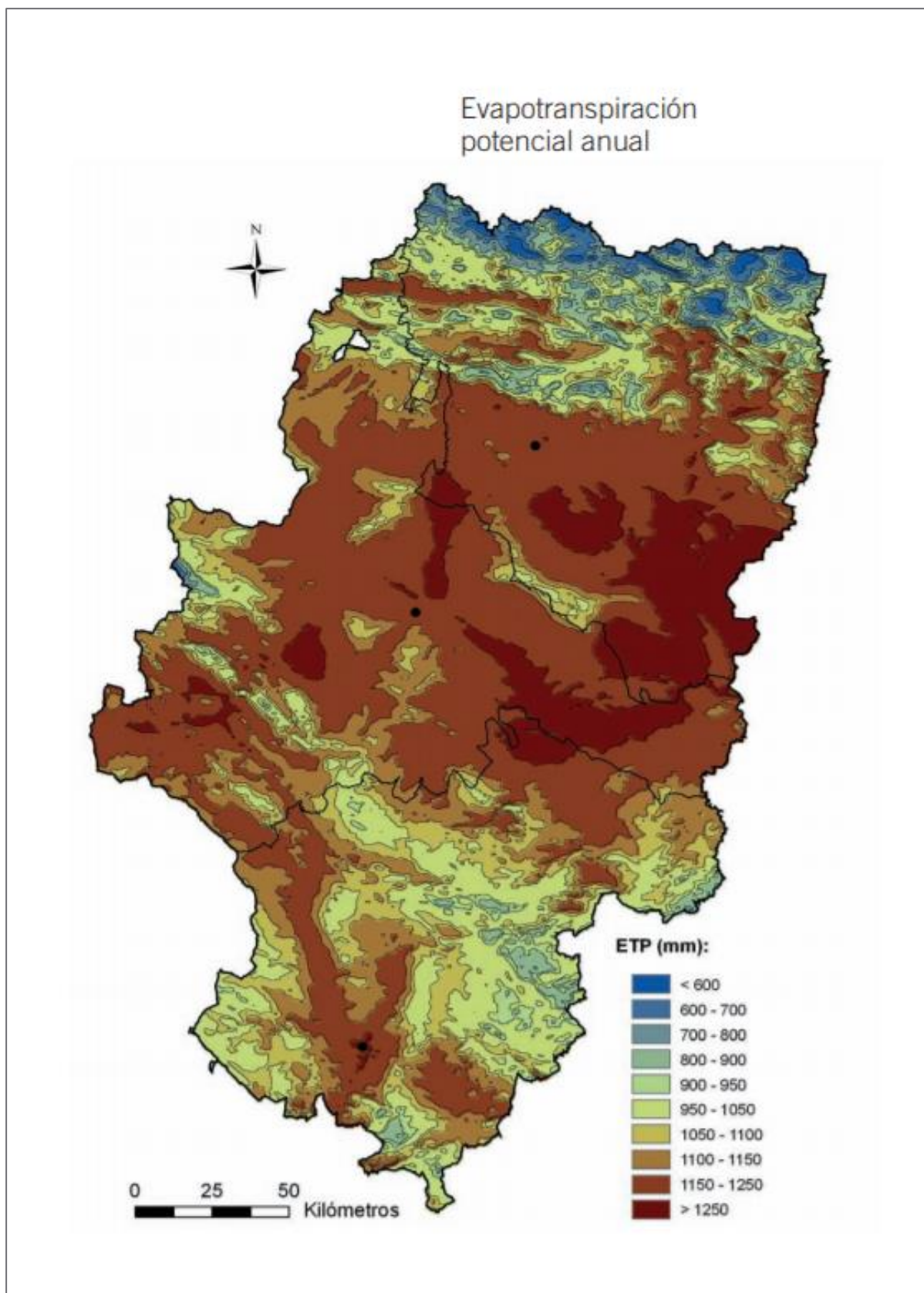


Figura 12.- Mapa de distribución de la Evapotranspiración potencial anual en Aragón. Fuente: López Martín et al., 2007

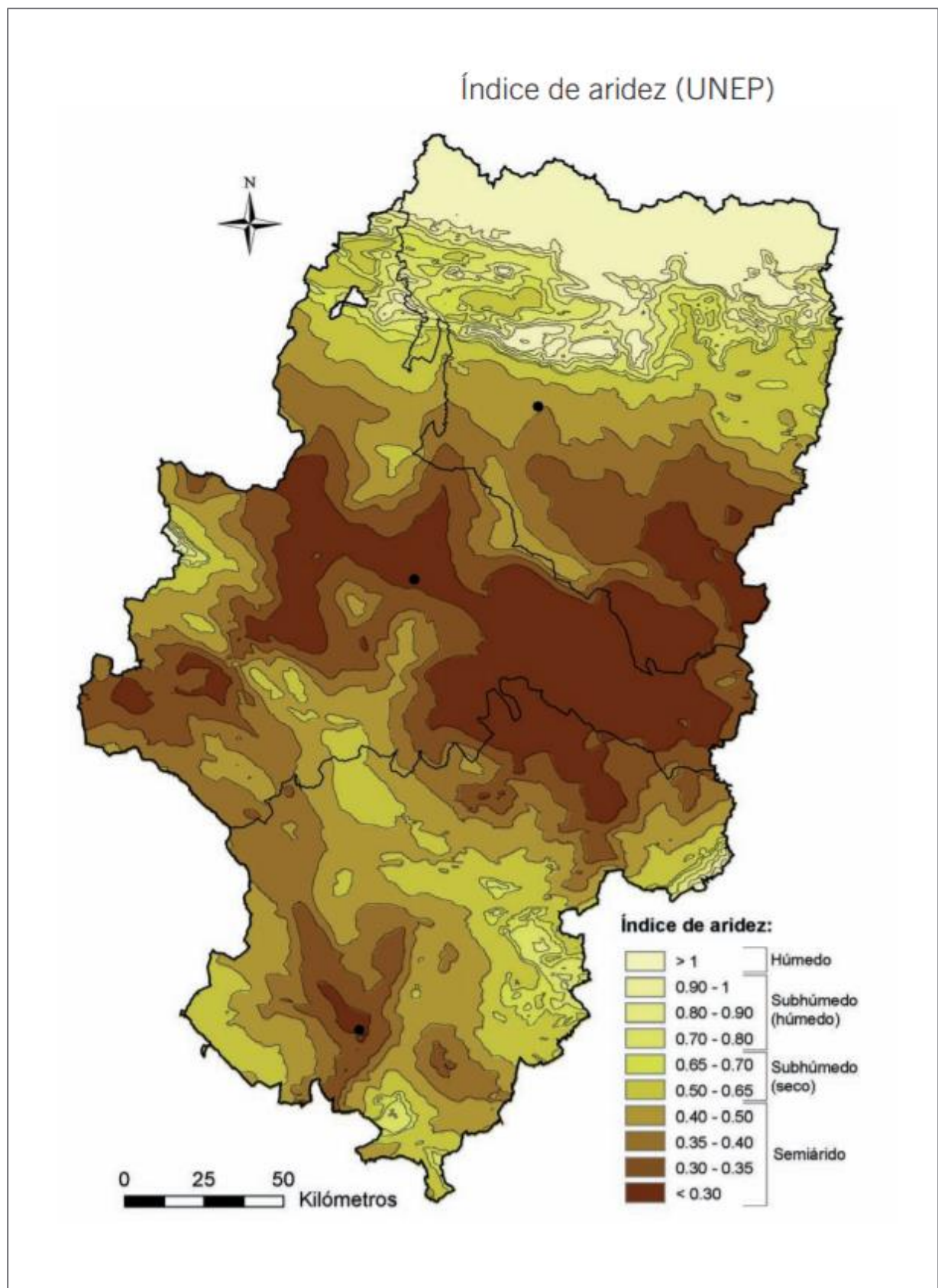


Figura 13.- Mapa de distribución de los valores obtenidos de la aplicación del índice de aridez en Aragón. Fuente: López Martín et al. (2007): Atlas Climático de Aragón. Edita: Gobierno de Aragón.

En el caso de Aragón, respecto al **clima** podemos apreciar en el mapa de distribución de las precipitaciones medias anuales (Figura 9), como los valores más elevados de precipitación se dan en las zonas de montaña correspondientes a los Pirineos y el Sistema Ibérico (aunque algo menores en este) y como éstos van disminuyendo progresivamente a medida que nos adentramos en la zona central del Valle del Ebro. Cabe destacar que, las precipitaciones más intensas en Aragón, además de las de montaña, corresponden a tormentas relacionadas con células convectivas, que tienen lugar fundamentalmente durante la primavera y el otoño y algunas en verano. El resto son lluvias de frentes de borrascas de escasa magnitud. Por eso, los mayores valores de escorrentía y erosión tienen lugar en primavera y otoño. También la intensidad de las precipitaciones varía considerablemente dentro de las células convectivas, pudiendo llegar a superar la precipitación producida durante un evento tormentoso al total de la precipitación media anual.

En el caso de las temperaturas (Figura 8) , la distribución se produce totalmente de forma inversa que las precipitaciones. Mientras la zona central del Valle del Ebro es la que presenta unos valores medios anuales superiores (15-14°), a medida que nos desplazamos hacia norte y sur y subimos en altura, los valores descienden hasta llegar a los mínimos en la franja pirenaica más elevada, en el sector del Moncayo y en los sectores de las sierras de Gudar, Javalambre y Albarracín (6°). Estas distribuciones de temperatura y precipitaciones se deben fundamentalmente al efecto de la continentalidad y orografía, pues la zona central del Valle del Ebro esta completamente rodeada por formaciones montañosas (Pirineos, Sistema Ibérico, Cordillera Costero-Catalana y Montes Vascos) de tal modo que dificultan la entrada de masas de aire húmedo al valle, suponiendo un descenso acusado de las precipitaciones, un aumento también acusado de la amplitud térmica y la generación del efecto Föhn, que produce masas de aire cálido que secan el ambiente e impulsan la formación de las zonas semiáridas y desiertos (Los Monegros). Además, esta distribución inversa es la que explica en gran medida el mapa de la Evapotranspiración potencial anual de Aragón (Figura 12) pues, las zonas con unos valores de ETP superiores (práctica totalidad de la provincia de Zaragoza, exceptuando los sectores de Tarazona y el Moncayo y el norte de Cinco Villas y gran parte de la provincia de Huesca, destacando el sector de los Monegros y la Hoya de Barbastro) hacen referencia fundamentalmente a aquellas donde las precipitaciones son escasas y las temperaturas elevadas, mientras que los valores de ETP medio bajos

y más bajos (provincia de Teruel, destacando las Sierras de Gudar, Javalambre y Albarracín y las zonas más elevadas de las comarcas pirenaicas) se dan en zonas con unas precipitaciones superiores a las temperaturas.

Así pues, la existencia de unas exiguas precipitaciones, unas altas temperaturas y unos elevados valores de ETP en la mayor parte del territorio aragonés, repercuten en que en casi toda la comunidad se den unos elevados valores de aridez (Figura 13), quedando un 69.9% del territorio bajo la denominación semiárido, alcanzándose los valores más extremos para el índice de aridez en el eje del Ebro, Bajo Aragón, Bajo Jalón y Bajo Cinca, el cual se encuentra por debajo de 0.3 según el Atlas Climático de Aragón.

En cuanto a la **edafología** (Figura 10), como podemos ver en el mapa de la diversidad edáfica de Aragón, son los calcisoles, gipsisoles, regosoles, cambisoles y umbrisoles las variedades de suelos más presentes en este territorio, destacando sobre todo los dos primeros. Dadas las características edáficas generales de las zonas semiáridas comentadas anteriormente, no es de extrañar la existencia de estos tipos de suelos en Aragón, pues presentan rasgos característicos como la existencia de un horizonte cálcico en el caso de los calcisoles y gipsisoles; el desarrollo sobre materiales sueltos y poco consolidados como es el caso de los regosoles o su desarrollo sobre morfologías propias de estas zonas como terrazas o glacis. No obstante, cabe señalar que tanto los cambisoles como los umbrisoles, aunque también ocupan una extensión de terreno considerable, su localización está básicamente en las zonas relativas al Pirineo, siendo suelos que sí tienen una buena fertilidad y están altamente desarrollados.

En el caso de la **vegetación** (Figura 11), aunque las precipitaciones son importantes en cualquier ámbito, en las zonas semiáridas son fundamentales para su desarrollo. Dado que las zonas semiáridas se caracterizan por poseer unas precipitaciones escasas entre los 100 y 500 mm, la vegetación que se desarrolla a partir de ellas es de tipo arbórea o de arbustos y hierbas, la cual de forma general es una etapa de degradación por la intervención humana. En el caso aragonés y según el Mapa de formaciones vegetales actuales de Aragón, distinguimos 4 grupos de formaciones arbustivas y arbóreas: los bosques de frondosas marcescentes (rebollar y quejigar), los bosques de frondosas perennifolias (alcornocal, encinar y acebuchal), los bosques de coníferas (pinar negro, abetal, pinares de pino silvestre y otros pinares) y los

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

bosques de frondosas caducifolias (bosque mixto caducifolio y hayedos). Además de estos cuatro grupos, cabe destacar que, en la mayor parte de la zona central de la Depresión del Ebro, la cual reproduce más fielmente el intervalo de precipitaciones antes comentado, encontramos matorral y pastizal y, en las zonas más próximas al río vegetación de ribera, siendo las formaciones antes citadas más propias de zonas más elevadas y más próximas a los Pirineos y al Sistema Ibérico, zonas que sí poseen unas precipitaciones algo más elevadas.

Sobre los **procesos geomórficos** y las **morfoestructuras**, casi en todo Aragón encontramos morfologías muy ligadas a las propias condiciones ambientales y edáficas existentes (figura 14), aunque también en muchos casos se suma a ellos una componente antropogénica que da lugar a ciertas formas muy comunes (bancales).

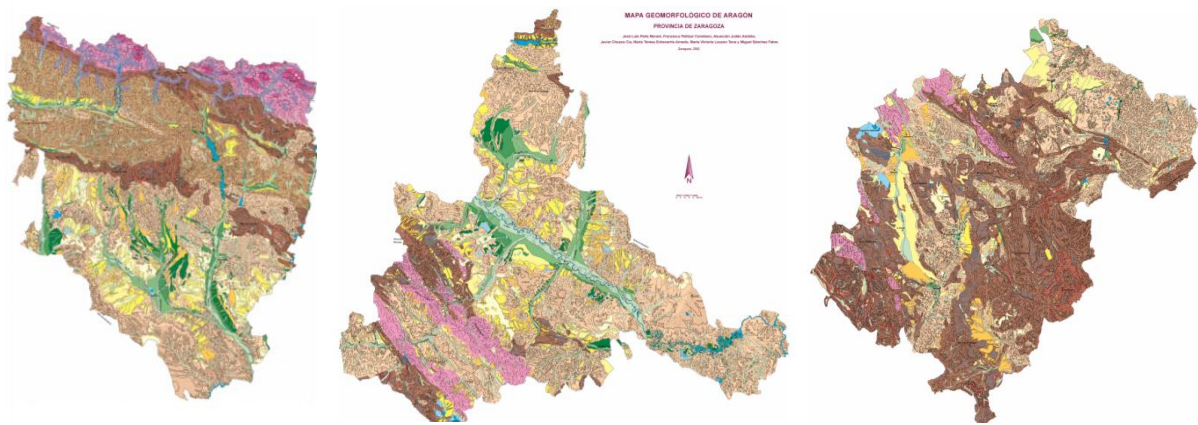


Figura 14. -Mapa geomorfológico de Aragón dividido por provincias (Huesca, Zaragoza y Teruel respectivamente). Las zonas más erosionables -colores beige-, representan formaciones detríticas y evaporíticas (yesos y sales) terciarias. Fuente: Peña Monné et al. 2002

En cuanto a los procesos característicos que podemos encontrar en Aragón y que dan lugar a las formas que observamos, basándonos en (Gutiérrez Elorza, 2001) podemos destacar los ligados a la **meteorización** (termoclastismo, hidroclastismo, haloclastismo, disolución y actividad biológica) y la **erosión hídrica** (splash y piping). Dentro de los procesos de meteorización encontramos el **termoclastismo**, que hace referencia al proceso por el cual las variaciones de temperatura que experimenta una roca dan lugar a dilataciones y contracciones que pueden llevar a la rotura de la misma, pudiendo proceder el calor suministrado de la radiación solar o, en ocasiones, de fuegos relativamente frecuentes en ambientes semiáridos; el

hidroclastismo, que es el proceso que se produce cuando una roca está sometida a numerosos ciclos de humedecimiento y secado que producen efectos disruptivos. La desintegración se manifiesta por una descamación y fracturación de la roca, preferentemente a lo largo de los planos de fisibilidad existentes; el **haloclastismo**, que es el proceso por el cual las sales contenidas en el agua que se introduce en los poros rocosos precipitan, produciéndose una expansión volumétrica de las mismas que generan esfuerzos disruptivos, los cuales conducen a la desintegración de las rocas; la **disolución de rocas karstificables** (calizas y evaporitas). En el centro de la Depresión del Ebro, con precipitaciones en torno a los 300 mm, aflora una potente formación de yesos miocenos de origen continental. En ella se desarrollan importantes campos de dolinas, muchas de karst cubierto, y sistemas de galerías próximas a la superficie (Gutiérrez et al., 1988; Benito y Pérez del Campo, 1991; Benito et al., 1995; Gutiérrez Elorza, 2001) y la **actividad biológica** ligada a bacterias, hongos, algas o líquenes que produce la meteorización de rocas y suelos. Estos organismos se desarrollan sobre la superficie de las rocas y suelos, o en el interior de los mismos. Esta actividad biológica, resultante de procesos vitales o de productos segregados, produce cambios sustanciales en la micromorfología superficial, la expansión y contracción de bacterias y líquenes, en relación con variaciones en el contenido de agua, produce la desintegración de la roca por disgregación granular y descamación, tanto en superficie como en espacios confinados.



Fotografía 1.- Arenisca calcárea oligocena colonizada por líquenes y afectada por una intensa descamación. Depresión del Ebro. Albeda (provincia de Huesca). Fuente: (Gutiérrez Elorza, 2001)



Fotografía 2.- Eflorescencias salinas en areniscas calcáreas miocenas de la depresión del Ebro. El Tormillo (provincia de Huesca). Fuente: (Gutiérrez Elorza, 2001)

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

Entre las morfologías que se desprenden de los procesos de meteorización, (Gutiérrez Elorza, 2001) distingue entre los **alveolos y tafonis** (en laderas rocosas inclinadas) y los **gnammas o pilancones** (en superficies horizontales o de escasa inclinación). El primer grupo hace referencia a oquedades centimétricas (alveolos) o métricas (tafonis) que se producen en las rocas como consecuencia de la meteorización de la parte superior o basal de la roca respectivamente (Fotografía 3). El segundo grupo, hace referencia a pequeñas depresiones cerradas de diámetro y profundidad variable que suelen presentarse por lo general agrupadas y suelen adquirir una morfología circular o elíptica, aunque pudiendo tener también bordes muy irregulares (Fotografía 4).



Fotografía 3.- Tafonis sobre una pared rocosa constituida por areniscas calcáreas del Oligoceno, en la depresión del Ebro. Albelda (provincia de Huesca). Fuente: (Gutiérrez Elorza, 2001)



Fotografía 4.- Gnammas en pozo o pits, de desigual desarrollo, elaboradas en areniscas miocenas en la Depresión del Ebro. Región de Alcañiz (provincia de Teruel). Fuente: (Gutiérrez Elorza, 2001)

Dentro de los procesos de **erosión hídrica**, encontramos el impacto y salpicadura por las gotas de lluvia y la erosión por flujo superficial, aunque cabe destacar el primero dada su importancia, pues proporciona material movilizable por el flujo laminar (Gutiérrez Elorza, 2001). El impacto de las gotas de lluvia en el suelo genera un cráter por compresión y las partículas arrancadas se esparcen por cizallamiento, produciéndose un mayor efecto cuanto mayor es la energía cinética que poseen las precipitaciones, de ahí que los intensos episodios tormentosos característicos de muchas zonas de Aragón tengan una gran importancia en el desarrollo de este proceso. En cuanto a las morfologías producidas por la erosión hídrica, las cárcavas, los cañones, los barrancos o los canales son algunas de las formas más características, que se dan dentro de la comunidad. Cabe destacar sobre todo el caso de la zona de Los Monegros, la cual dada sus características está considerada como un "badland" en el que podemos encontrar una gran cantidad de las formas antes comentadas dada la falta de vegetación y la fuerte erosión tanto hídrica como eólica. Otras formas que suelen acompañar a los paisajes de badlands son los denominados pipes, una especie de tuberías que se desarrollan de forma natural como consecuencia del drenaje subsuperficial en rocas clásticas, que consiste en la

movilización de partículas sólidas que se transportan en suspensión por el agua (Parker, 1963; Gutiérrez Elorza, 2001).



Fotografía 5.- Pipes, colapsos y puentes en argilitas holocenas, que en su evolución desarrollan regueros o pequeños barrancos. Lupiñén (provincia de Huesca).

6.2. Erosión hídrica del suelo en el entorno semiárido aragonés

6.2.1. Estado de la cuestión de trabajos relacionados con la erosión hídrica

Centrándonos en los trabajos referidos a este campo realizados en Aragón, se pueden destacar 4 grupos de trabajo asentados en Zaragoza cuyos principios se remontan a los años 80 del pasado siglo. Por un lado, encontramos dentro del Departamento de Ciencias de la Tierra (Geología) de la Universidad de Zaragoza al grupo conformado por Mateo Gutiérrez Elorza, Francisco Gutiérrez Santolalla y Gloria Desir entre otros; en segundo lugar y dentro del Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC) encontramos al grupo conformado en torno a José M. García Ruiz, Teodoro Lasanta, Carlos Martí Bono y, más recientemente, David Regües y Sergio Vicente; en tercer lugar, en la Estación Experimental de Aula Dei encontramos el grupo conformado por Ana Navas, Javier Machín y Santiago Beguería y, por último, también cabe destacar dentro del Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza, al grupo conformado por María Teresa Echeverría, José Carlos González Hidalgo, Palamo

Ibarra, Juan de la Riva y Fernando Pérez Cabello (García Ruiz y López Bermúdez, 2009).

En cuanto a la localización y temática de los estudios de muchos de los autores citados anteriormente, cabe destacar que una buena parte de los estudios se han realizado en la Depresión del Ebro, dado a poseer las condiciones ambientales más favorables para establecerse procesos erosivos. En el Pirineo también se han realizado numerosos estudios, relativos sobre todo al abandono de tierras, mientras que los estudios llevados a cabo en el Sistema Ibérico turolense son casi insignificantes. Tanto en una como en otra zona, el método de estimación de la erosión ha sido la mayor parte de los casos cuantitativo, aunque también encontramos ejemplos mediante el método cualitativo.

En la **Depresión del Ebro** pueden destacarse los trabajos sobre litofacies yesíferas de **Navas** (1988, 1990z y b, 1991a) realizados mediante simulación de lluvia en la zona de Villamayor y, posteriormente, mediante sistemas de información geográficos en el área de Acampo Zaragoza (Navas y Machín, 1994; Juan Mandado, 2004) y los trabajos realizados por parte del equipo del **Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio**, referidos a la erosión en el área del Barranco de la Violada (González Hidalgo et al., 1990; Juan Mandado, 2004). Estos trabajos se basan principalmente en el uso de parcelas experimentales cerradas de pequeña escala (2 x 4 m) que se encuentran sobre laderas con exposiciones contrapuestas y en las relaciones espaciotemporales de los diferentes parámetros que controlan la respuesta de dichas laderas (González Hidalgo y Echeverría, 1990, González Hidalgo et al., 1990, 1992 en Juan Mandado, 2004). También Gloria Desir estudio la erosión sobre laderas naturales en yeso en La Puebla de Alinden y Mediana de Aragón, con el objetivo de conocer tanto las tasas de erosión, como la respuesta de la producción de escorrentía y sedimentos y la fijación de diferentes umbrales de intensidad y precipitación que controlan la erosión. (Desir, 2000 a y b; 2001, 2002; Desir et al., 1996).

En la Depresión del Ebro también, pero sobre litologías arcillosas, podemos destacar los trabajos de **Gutiérrez Rodríguez** (1984) y **Gracia** (1986) en los cuales se analizaron los procesos de piping en la Depresión media del Ebro; los trabajos de **Benito** (1989) y Benito et al., (1991 y 1992) en el Castillo de Orús (Huesca), en los que se pretendía analizar y cuantificar la erosión midiendo la producción de sedimentos y el

rebajamiento superficial en laderas y fondos de valle, mediante técnicas volumétricas, agujas de erosión y perfiladores microtopográficos, y los trabajos de **Sirvent et al.**, (1993, 1994) en la estación experimental de Lanaja (Huesca) mediante la combinación en microcuencas naturales del uso de métodos dinámicos y volumétricos (Juan Mandado, 2004)

Además de estos trabajos, **López Cadenas et al.**, (1987) mediante la aplicación de la USLE en la cuenca del Ebro, obtuvieron unos valores de hasta 200 Tn/ha/años para las series margo-yesíferas; **Desir et al.**, (1992) mediante parcelas experimentales con sistemas dinámicos sobre laderas naturales en yesos obtuvieron unas tasas de erosión de hasta 35 Tn/ha/año; **Navas** (1988) situó cifras de 81.7 Tn/ha/año de sales exportadas por la cuenca del Ebro al mar y **Desir Valen** (1950,2001) estudió en Lanaja (Los Monegros) la erosión hídrica mediante la utilización de Estaciones Experimentales en las que se ubicaron dos parcelas experimentales mediante las cuales se tuvo un registro continuo de escorrentía y producción de sedimentos superior a 10 años (Juan Mandado, 2004).

Como ya se ha comentado, en el área de los **Pirineos** también se han llevado a cabo numerosos trabajos, entre los que caben mencionar los realizados por **Lasanta** y su equipo y los trabajos de **Ruiz Flaño** referidos a los procesos de erosión en campos abandonados del Valle de Aísa (Pirineo aragonés), cuyo objetivo era analizar la evolución geomorfológica de los campos abandonados a través de parcelas experimentales, simuladores de lluvia, análisis de la red de drenaje, de los suelos, de los usos de suelo y la realización de transectos geomorfológicos y cartografías (Ruiz Flaño, 1993). En cuanto a los trabajos de Lasanta, éste también estudió junto a E. Nadal-Romero, Serrano-Muela, Vicente-Serrano, N. Lana, D. Regüés y García-Ruiz los procesos de escorrentía y erosión producidos tras el abandono de tierras de cultivo en montaña a través de los resultados obtenidos en la Estación Experimental del Valle de Aísa.

Otras mediciones de las tasas de erosión que se han realizado en Aragón son las referidas a las tasas existentes post-incendio. Tal como se afirma en (Pérez Cabello et al. 2012) en Aragón, en los últimos 15 años el equipo de **Badía** (Badía y Martí, 2000; Badía et al., 2010) ha abordado la respuesta de la erosión al fuego tanto en la Depresión del Ebro como en los Pirineos, en suelos sobre distintas litologías, bajo diferentes cubiertas vegetales y aplicando diferentes tratamientos postincendio.

El grupo de investigación GEOFOREST de la Universidad de Zaragoza integrado en el grupo Geomorfología y Cambio Global y en el Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA) aborda la cuestión de los fuegos forestales desde dos vertientes temporales: el modelado del riesgo de incendio mediante el análisis de factores físicos y socioeconómicos y el análisis y predicción de los efectos hidrogeomorfológicos sobre el tándem vegetación-suelo, utilizando técnicas experimentales e información procedente de la teledetección (Pérez-Cabello, 2002; Pérez Cabello et al., 2000, 2006).

A continuación, se exponen unas tablas en las que se arrojan las tasas de erosión obtenidas en algunos de los trabajos comentados anteriormente y otros. Como se puede ver, las tasas de erosión más elevadas se encuentran en las áreas de la Depresión del Ebro, hecho que no es de extrañar dado que es la zona que posee las condiciones ambientales más favorables para que se desarrolle este proceso. En algunos casos en la Depresión del Ebro las tasas sobrepasan las 11.2 Tn/ha/año, el máximo de tolerancia anual aceptada (Smidt et al. 1982). En Lasanta et. al (2015) también las tasas calculadas mediante la USLE sobrepasaban este máximo, aunque los autores destacan que in situ no existían muestras de actividad erosiva muy acusada. Como podemos observar, las tasas de erosión más elevadas fueron las obtenidas por Valen sobre materiales holocenos, con una tasa de erosión de 77 Tn/ha/año.

En cuanto a las tasas de erosión obtenidas en las investigaciones realizadas en el Pirineo, podemos observar que estas son mucho menores que las de la Depresión del Ebro. De entre estas, podemos destacar como las más relevantes al igual que en el caso anterior, aquellas en condiciones de barbecho. Esta práctica llegó a principios del siglo XX a ocupar el 36.8% del total de espacio cultivado en el Valle de Aísa y el 22.8% del total del Pirineo Central (Lasanta et al. 2006), produciendo coeficientes de escorrentía y erosión muy elevados.

	Área de estudio	Duración de estudio	Precipitación anual	Litología	Pendiente	Técnica empleada	Uso del suelo	Erosión producida
González Hidalgo (1992)	Sector Central del Valle del Ebro. (Depresión de la Violada)	1990-1992	Media anual 500 mm	Calizas, margas y yesos y material de origen fluvial	29.9-31.1%	Estación experimental con parcelas de trabajo	Cultivos de regadío Cultivos de secano Matorral	100% cubierta vegetal: 15.2 gr/m ² 80 % cubierta vegetal: 48.4 gr/m ² 60% cubierta vegetal: 242.1 gr/m ² 20 % cubierta vegetal: 256.5 gr/m ² 0% cubierta vegetal (sur): 979.4 0% cubierta vegetal (norte): 1816.5
Desir Valen (1992)	Sector Central de la D. Ebro		Media anual 350 mm	Materiales terciarios y materiales holocenos		Microcuencas instrumentales		32.03 Tn/ha/año en materiales terciarios 77.21 Tn/ha/año en materiales holocenos
Desir Valen (2001)	Sector Central de la D. Ebro (Puebla de Alfindén y Mediana de Aragón)	10 años	Media anual 350 mm	Materiales margo-yesíferos miocenos	15-24%	Estaciones experimentales		Tasa media: 2.84 Tn/ha/año
T. Lasanta et al. (2008)	Sector Central de la D. Ebro		Media anual 300 mm	Sustrato de areniscas y lutitas terciarias	10-20%	Estación experimental con simuladores de lluvia	Ladera cubierta por matorral y sometida a pastoreo ocasional	25-50 Tn/ha/año (aplicación de USLE)
Perez-Cabello et al. 2010	Sector Central de la D. Ebro (Peñaflor)		Media anual 300-350 mm	Material coluvial asentado sobre sustrato terciario	12%	Estación experimental con parcelas de erosión	Matorral	0.567 Mg/ha/año un año después del incendio experimental

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

D. Badía et al. (2015)	Sector Central de la D. Ebro (Montes de Zuera)	2009-2010	Media anual 450 mm	Material parental de roca caliza		Parcelas de erosión y simuladores de lluvia	Zonas de bosque afectados por incendios	
-------------------------------	--	-----------	--------------------	----------------------------------	--	---	---	--

Tabla 5. – Tasas de erosión estimadas a partir de trabajos realizados en el Sector Central de la Depresión del Ebro (Aragón). Fuente: Elaboración propia a partir de los trabajos de Glez. Hidalgo (1992), Desir Valen (1992), Perez-Cabello et al. (2010), T. Lasanta et al. (2008) y D. Badía et al. (2015)

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

	Área de estudio	Duración de estudio	Precipitación anual	Litología	Pendiente	Técnica empleada	Uso del suelo	Erosión producida
Ruiz Flaño (1993)	Pirineo aragonés (Valle de Aísa)		Media anual 1000 mm	Flysch eoceno	20-40 %	Transectos geomorfológicos Parcelas experimentales Simuladores de lluvia Trabajo de laboratorio Tratamiento estadístico	Campos abandonados	Descalzamientos (942 gr/m ² /año) Erosión nula (9 gr/m ² /año) Erosión difusa fuerte (852 gr/m ² /año) Enlosado (299 gr/m ² /año) Erosión difusa en prado (235 gr/m ² /año) Erosión difusa débil en matorral (98 gr/m ² /año)
T. Lasanta et al. (2006)	Pirineo Central (Estación Valle de Aísa)	1992-2003	Media anual 1100 mm Máx. diario: 95 mm	Flysch eoceno	32%	Parcelas experimentales (10 x 3)	Zonas agrícolas Pasto Bosque	Campos en pendiente (530 kg/ha/año) Campos abandonados (436 kg/ha/año) Parcela en barbecho (1639 kg/ha/año)
Beguería Portugués (2010)	Pirineo Occidental (Cuenca del Embalse de Yesa)		Media en torno a 800 mm	Flysch eoceno		Teledetección Sistemas de Información Geográfica	Pastizal Bosque Matorral Cultivos	Erosión nula (64.8%) Erosión moderada (10.3%)

Tabla 6. – Tasas de erosión estimadas a partir de los trabajos realizados en diferentes sectores del Pirineo Central (Aragón) Fuente: elaboración propia a partir de los trabajos de Ruiz Flaño (1993), T. Lasanta et al. (2006) y Beguería-Portugués (2010)

Por otro lado, García Ruiz (1996) estudió las tasas de erosión producidas en distintos usos de suelo: en la ártica obtuvo tasas de erosión de 10 Tn/ha/ año, en campos con cereal fertilizado tasas de 5.20 Tn/ha/ año, en zonas con matorral denso tasas de 1.10 Tn/ha/ año y en campos en barbecho tasas de 15.50 Tn/ha/ año. Así pues, el barbecho es sin duda la más agresiva. El hecho de no cultivar estos campos durante uno o dos años con el objetivo de "dejar descansar la tierra" para mejorar el cultivo en los próximos momentos de siembra, hace que al desprotegerlos de vegetación estos espacios sean extremadamente a la erosión. En contraposición observamos como de entre los usos del suelo estudiados, el matorral denso es el que menor tasa de erosión presenta. Esto es debido a que la buena cobertura hace que las hojas intercepten las gotas de lluvia y, por tanto, frenen su energía cinética y la cantidad de éstas que llegan al suelo disminuyendo así la erosión.

6.2.2. Reflexión sobre la erosión antrópica. Sobreexplotación agrícola y ganadería. Abandono de usos tradicionales del suelo

Es innegable que la **agricultura** ha sido la actividad humana que más ha intervenido en la degradación de los suelos a nivel global, ya sea por la elevada extensión de tierras que ocupa o por la larga vinculación que presenta con el ser humano desde hace miles de años (Martín de Santa Olalla Mañas, 2001). Antes de su aparición en el Neolítico, el hombre vivía como un animal más, pero es en este momento es cuando se produce la primera X contra la naturaleza.

Aunque la agricultura no supone en sí misma una amenaza para el medio ambiente, su intensificación puede conllevar la realización de prácticas inadecuadas cuyas consecuencias negativas no se manifiestan de manera inmediata, sino más bien al cabo de los años (López Bellido, 1998; Martín de Santa Olalla Mañas, 2001). Aunque a lo largo de la historia se hayan ido desarrollando técnicas agrícolas más o menos agresivas con el medio natural, el siglo XX marca un punto y aparte en la explotación de los recursos naturales, pues es cuando se produce la incorporación de la energía mecánica, los fertilizantes o los plaguicidas a la agricultura, lo que supone su intensificación como consecuencia del aumento poblacional generalizado. No obstante, pese a este aumento poblacional cabe destacar que, a lo largo del siglo, pero sobre todo a partir de los años 50, se produce el fenómeno conocido como “éxodo rural” que azotaría fuertemente a las áreas de montaña aragonesas.

Esta intensificación trajo consigo un mayor nivel de producción, capaz de hacer frente a las demandas poblacionales, pero también un mayor deterioro del medio ambiente, con actuaciones que han provocado efectos negativos sobre el medio ambiente. Entre estas actuaciones (Molinero, 1990; López Bermúdez, 1995^a; López Bermúdez, 1995^b; López Bellido, 1998 en Martín de Santa Olalla Mañas, 2001) destacan:

- La **deforestación** causada por la expansión de pastos y cultivos, aunque también por el aumento de incendios y para satisfacer las demandas de madera.
- El **laboreo inadecuado** que ocasiona la degradación del suelo y su erosión, tal como la excesiva mecanización, que favorece la destrucción de la estructura del suelo; el laboreo con máquinas pesadas que conlleva su compactación;

el laboreo en el sentido de la máxima pendiente y cultivos en hileras, que conduce a una mayor incidencia de la erosión hídrica; o el laboreo de tierras marginales, con suelos inapropiados para ese uso, que favorece su degradación.

- La utilización prolongada y a gran escala de **fertilizantes químicos** y de **productos fitosanitarios**. Los primeros, fundamentalmente los nitrogenados, han ocasionado la contaminación del suelo, su acumulación en aguas subterráneas y superficiales, disminución de los microorganismos del suelo e inhibición de la fijación del nitrógeno.
- La **expansión inadecuada de los regadíos**, con el empleo de sistemas no adaptados a las condiciones del suelo, que provocan su degradación; mal manejo del riego y deficiente conocimiento de las necesidades hídricas de los cultivos, que pueden traer como consecuencia el malgasto del agua o la salinización de los suelos; aumento de las superficies regadas y expansión de los cultivos con requerimientos hídricos elevados, con la consiguiente sobreexplotación de las aguas superficiales y subterráneas y la salinización de pozos por intrusión marina en las zonas costeras.
- La **disminución de la variabilidad genética** por la regresión de la utilización, casi desaparición en algunos casos, de especies y cultivares autóctonos y/o tradicionales en beneficio de aquellos producidos por las empresas de semillas, híbridos en muchos casos, con techos productivos mayores y con mayores resistencias a plagas, enfermedades y condiciones ambientales adversas.
- El **pastoreo excesivo**, que reduce progresivamente el recubrimiento vegetal, aumentado así los efectos de la erosión hídrica y eólica. Este hecho es especialmente grave en regiones de equilibrio crítico, ya que la irregularidad de las lluvias no permite que los pastos soporten a los rebaños durante los años secos.
- La **disociación de la agricultura y la ganadería**, lo que ha provocado por una parte la escasez de fertilizantes orgánicos en el campo y ha obligado al uso de los abonos químicos y por otra, ha llevado a que la ganadería intensiva haya originado problemas de contaminación por el exceso de residuos.
- La **despoblación del medio rural**, consecuencia de la mecanización de la agricultura, lo que conlleva el abandono de tierras de cultivo marginales, donde la maquinaria no tiene un fácil acceso; el abandono de prácticas de

conservación del suelo, tales como muros de piedra en los cultivos en terrazas o en laderas o pequeños diques; el abandono de los sistemas tradicionales de aprovechamiento de la escorrentía estacional o episódica que circula por ramblas y otros cursos de agua temporales.

Uno de los efectos más importantes que se ha desprendido de estas actuaciones, es la erosión, la cual en sí misma tampoco supondría un problema ambiental, pero la combinación de estas actuaciones (entre otras) a lo largo del tiempo ha hecho que las tasas de erosión sobrepasen la naturalidad del proceso. Ante esto y frente al imparable crecimiento de la población y su concentración en zonas muy específicas (en el caso de Aragón, más de la mitad de la población se localiza en Zaragoza) puede desprenderse la pregunta de ¿hasta cuándo va a dar de sí el suelo y la tierra?

Podría pensarse que la solución queda resuelta en aquellas zonas que dejan de estar pobladas, pues se suele aceptar de forma generalizada que el abandono de tierras reduce los procesos de erosión y escorrentía, pero esta creencia no siempre es del todo cierta como estudió Ruiz Flaño et al., (1992). Los efectos dependen de diversos factores y hay que tener en cuenta aspectos que influyen en gran medida como las condiciones climáticas, la fertilidad de cada campo o la gestión de las zonas tras el abandono (García Ruíz y López Bermúdez, 2009). Así pues, a la mecanización de las labores agrícolas como consecuencia de la intensificación de la agricultura durante los años 50 del siglo XX, se le sumó un movimiento conocido como "éxodo rural", que supuso la migración de población desde las áreas rurales, sobre todo de montaña, a la ciudad. Estos hechos impulsaron el **abandono de tierras** en las zonas despobladas y como consecuencia de esto, en Aragón las laderas que se cultivaban antiguamente en los Pirineos se han abandonado por completo o se han convertido en prados utilizados para el aprovechamiento directo del ganado (García Ruíz y López Bermúdez, 2009), siendo los campos de peor calidad los primeros abandonados y limitándose actualmente la superficie cultivada a menos del 3% del total (Lasanta et al., 2010). En zonas de pendiente, pero con unas condiciones climáticas más benignas, como es el caso del Sistema Ibérico aragonés, algunos campos en pendiente siguieron siendo cultivados con cerezos y almendros entre otros, pero aun así la tendencia al abandono estuvo generalizada.

Aunque en menor medida, en las zonas llanas también se produjo el abandono de muchas tierras de cultivo, aunque en estos espacios las causas fueron muy distintas.

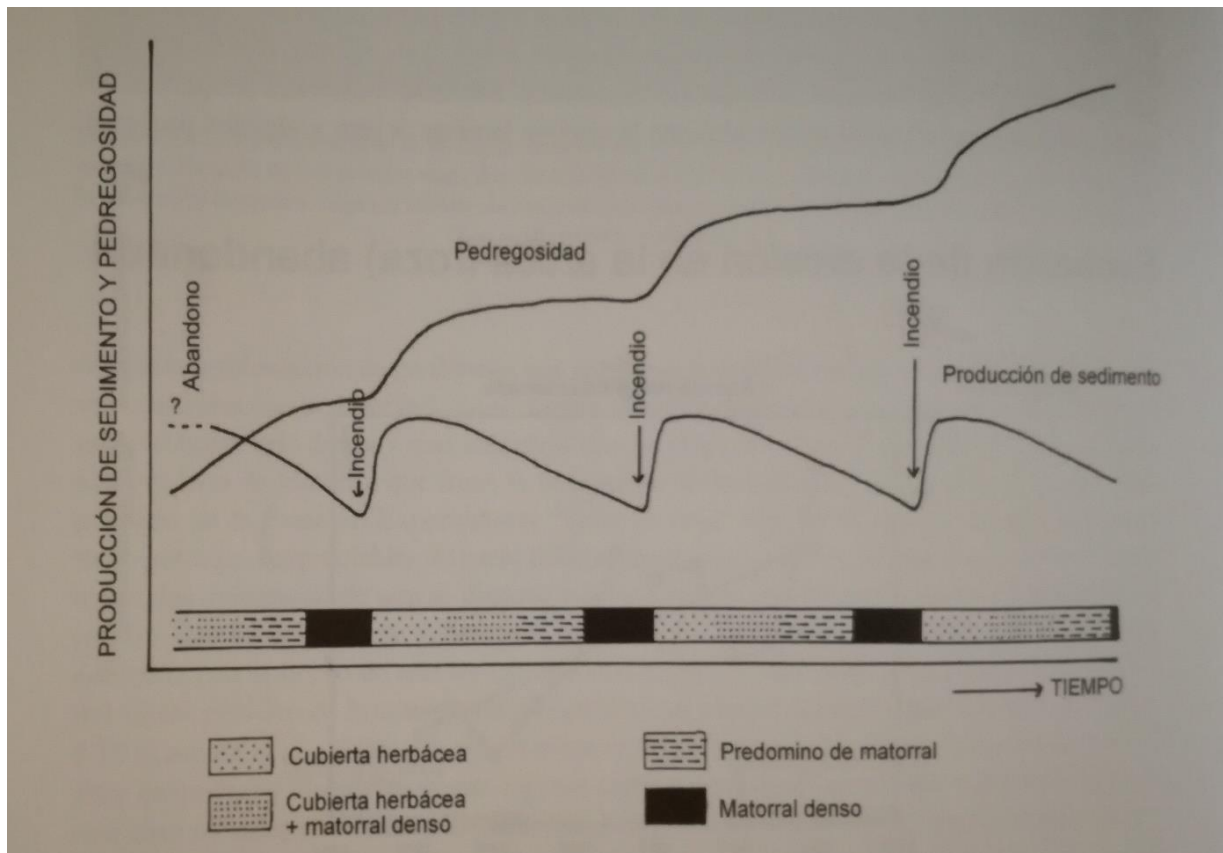
En estos casos, la razón fundamental de abandono ha sido, como apuntan José M. García Ruiz y Francisco López Bermúdez (2009), la Política Agraria Común (PAC), que vio el abandono de cultivos de secano y regadío como una medida para proteger el suelo y reducir excedentes.

Respecto a los efectos del abandono de tierras sobre la vegetación y, por tanto, sobre la erosión y procesos de escorrentía, los resultados obtenidos por Ruiz (1993), García Ruiz et al. (1991) y Ruiz Flaño et al. (1992) sugieren que los campos abandonados siguen dos tendencias evolutivas: Si la sucesión vegetal no se ve interrumpida por incendios o sobrepastoreo (Fotografía 6), el matorral llega a cubrir totalmente el suelo y la erosión se reduce al mínimo. Pero si la gestión humana dificulta la colonización vegetal, se instala un matorral abierto que permite la génesis de procesos de erosión difusa fuerte y descalzamientos, que en un estadio muy avanzado de degradación conducen a campos cubiertos completamente por pavimentos de piedras (Lasanta et al., 2010). Por tanto, de esto se desprende que, de producirse el abandono de tierras, es necesaria una gestión que proteja y asegure la instalación de formaciones vegetales de manera progresiva y natural, pues en numerosos casos se ha comprobado que la realización de repoblaciones de forma no organizada puede ser un agravante de la situación. Estos casos se han producido con frecuencia tras la producción de incendios forestales, los cuales eliminan la vegetación protectora del suelo y generan elevadas tasas de erosión y escorrentía. Los incendios forestales han sido estudiados en Aragón por autores como León Miranda et al, Badía et al y Pérez Cabello.

En cualquier caso, la solución a los problemas ambientales relativos al recurso suelo no puede llevarse a cabo por otro agente que no sea el ser humano, al cual además le corresponde esta responsabilidad dada su elevada implicación en la degradación, la cual, aunque viene de siglos atrás sigue produciéndose hoy en día, por lo que no excusa a las poblaciones actuales de quedarse al margen de la resolución del problema. Dado que la causa principal de los procesos de erosión acelerada ha sido el desarrollo de las labores agrarias, una posible solución podría pasar por el desarrollo de nuevos sistemas de cultivo o producción más respetuosos con el suelo como son los expuestos por Amezketa y Aragués: el laboreo de conservación, el acolchado, los sistemas de riego, las enmiendas químicas, los acondicionadores sintéticos, la adición de materia orgánica y la rotación de cultivos, son las técnicas de conservación de suelos que proponen estos dos autores en su

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

publicación "La conservación de suelos: un reto para el regadío aragonés" en la revista Estructuras Agrarias.



Fotografía 6.- Modelo de evolución de campos abandonados con fuerte intervención humana. El modelo contempla la ocurrencia de frecuentes incendios que aumentan periódicamente la producción de sedimento al interrumpir la sucesión vegetal, mientras la pedregosidad superficial se incrementa con el tiempo debido a la erosión de materiales finos. Fuente: (Ruiz Flaño et al., 1992 en García Ruíz y López Bermúdez 2009)

7. Conclusiones

Pese a la falta de concienciación general sobre el importante problema que constituye la erosión, aun siendo igual de grave que otras amenazas como muy mediatizadas como el Cambio Climático, dentro de la comunidad científica la erosión ha suscitado el interés de edafólogos, geólogos y geógrafos entre otros profesionales, quienes han estudiado aspectos como los factores desencadenantes de la erosión, los tipos, sus efectos y, sobre todo, los métodos y técnicas para cuantificarla. Respecto a esto y tras la revisión bibliográfica realizada, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- La erosión es uno de los procesos más importantes que influyen en la degradación de los suelos, la cual a su vez repercute sobre la degradación de las tierras y es el factor desencadenante de la desertificación
- El verdadero problema de la erosión es su afección al suelo y no tanto al sustrato litológico, pues el suelo es el recurso que soporta todas las actividades humanas y el principal sustento para la vida
- De entre los tipos de erosión, la erosión hídrica ha sido la más estudiada a lo largo del tiempo debido a ser una de las principales amenazas para los suelos de las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas del mundo, entre las cuales se encuentra buena parte del territorio aragonés, destacando sobre todo la Depresión del Ebro
- De entre los factores que influyen en la erosión hay autores que afirman que la vegetación es el más importante, dado que la presencia de una cobertura de vegetación intercepta las gotas de lluvia reduciendo en gran medida la cantidad y la energía de las gotas al llegar al suelo
- Pese a ser un proceso ignorado durante muchísimo tiempo, la comprobación de sus efectos sobre la estabilidad económica y política de los sistemas humanos hizo que entonces se contemplara como un problema y se desarrollaran métodos para su cuantificación y así poder establecer un umbral a partir del cual el proceso comienza a ser verdaderamente preocupante
- Los métodos y técnicas para la medición de la erosión hídrica son tan abundantes y variados que se decidió agruparlos según diversos criterios (cualitativos o cuantitativos; de estimación directa o indirecta: métodos estadísticos, empíricos o conceptuales con base física)

- Pese a la existencia de una gran variedad, todos los métodos de estimación poseen ventajas unos frente a otros y, por tanto, no puede establecerse un método que este considerado como el mejor, pese a que la USLE haya sido uno de los métodos más utilizados a lo largo del tiempo. Así pues, la utilización de uno u otro método variará sobre todo en función de los objetivos de los proyectos
- La zona central de la Depresión del Ebro y su extensión hacia los Somontanos Pirenaico e Ibérico está caracterizada por poseer unas elevadas temperaturas, unas muy escasas precipitaciones, una muy elevada evapotranspiración potencial, unos suelos muy poco estructurados (calcisoles y gypsisoles) y una muy escasa vegetación (matorral y pastizal fundamentalmente) que hacen que gran parte del territorio aragonés este identificado como "semiárido" al poseer unos valores de aridez inferiores a 0.3
- Las condiciones ambientales ligadas a la aridez favorecen en gran medida los procesos de erosión y el desarrollo en Aragón de formas geomorfológicas muy representativas como las cárcavas,
- Buena parte de los estudios sobre erosión hídrica llevados a cabo en Aragón se han desarrollado en la zona central de la Depresión del Ebro, por ser la zona dónde, debido a sus características ambientales, los procesos de erosión son más relevantes
- Aunque en menor medida, también investigadores, sobre todo del Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC) a través de la estación experimental "Valle de Aísa", se han encargado del estudio de la evolución geomorfológica de los campos abandonados durante el siglo pasado
- Como era de esperar, las tasas de erosión más elevadas desprendidas de las investigaciones realizadas en Aragón se dan en la zona central de la Depresión del Ebro.
- De las pruebas realizadas en distintos usos de suelo, las tasas de erosión de los autores suelen coincidir señalando el barbecho como la práctica más sensible a la erosión, superando las tasas de los campos en pendiente o los campos abandonados.
- Los incendios analizados en el sector central de la Depresión del Ebro suponen un factor que desencadena cambios en el suelo –reduciendo la capacidad

de infiltración- y aumentando las tasas de escorrentía y producción de sedimentos.

- Aunque desde la puesta en marcha de la agricultura se han desarrollado técnicas más o menos agresivas con el suelo, el siglo XX marca un punto crítico por traer consigo un aumento poblacional que conlleva a la intensificación de la agricultura a través de la mecanización de la misma y de la incorporación de productos químicos muy agresivos con el objetivo de conseguir una mayor productividad
- Pese a que existe un pensamiento generalizado sobre que el abandono de tierras implica una reducción de las tasas de erosión hídrica, existe un debate abierto en la comunidad científica pues, el descenso o desaparición de la erosión tras el abandono depende fundamentalmente de la gestión que se haya realizado anteriormente, pero, sobre todo, de la que se realice posteriormente.

8. Bibliografía

Alatorre, L. C., Beguería, S. (2009): *Identificación de zonas de erosión activas y áreas de riesgo mediante teledetección: un ejemplo en un paisaje de cárcavas sobre margas en el Pirineo Central español*. Cuadernos de Investigación Geográfica, 35, pp. 171-194.

Alatorre, L. C., Beguería, S., Lana-Renault, N., Navas, A. (2013): *Modelización espacialmente distribuida de la erosión y el transporte de sedimento en cuencas de montaña del Pirineo Aragonés: retos para la calibración y validación*. Cuadernos de Investigación Geográfica, 39, pp. 287-314.

Almorox Alonso, J., López Bermúdez, J y S. Rafaelli. (2010): *La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación*. Murcia: Universidad de Murcia.

Amezketta. E y Aragués. R. *Conservación de suelos en Aragón*. Estructuras Agrarias.

Arnáez, J., Lana-Renault, N., Ruiz-Flaño, P., Pascual, N y Lasanta, T. (2007): *Mass soil movement on terraced landscapes of the mediterranean mountain areas: a case study in the iberian range*. Cuadernos de Investigación Geográfica, 43, pp. 83-100.

Bermúdez, F. L. (2002): *Erosión y desertificación: Heridas de la Tierra*. pp 189. Nivola.

Camargo, C., Pachecho, C., y López, R. (2017). *Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el usos de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica*. pp. 265-280.

Campo, J. G., s.f. *Respuestas de la vegetación y de la morfología de las plantas a la erosión del suelo. Valle del Ebro y Prepirineo Aragonés*. s.l.:s.n.

Cerdà, A. (2001/2002): *Agricultura y erosión en España: mitos y realidades*. Saitabi, 51-52, pp. 473-501.

Cerdà, A. (2008): *Erosión y degradación del suelo agrícola en España*. pp 238. Cátedra Divulgación de la Ciencia. Universitat de València.

Cerdà, A. (1999): *Clima y erosión hídrica en ecosistemas mediterráneos de Israel*. Cuadernos de Geografía, s 65-66, pp. 325-333.

Cerdà, A. (2001). *La erosión del suelo y sus tasas en España*. Ecosistemas, 3.

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

Cerdà, A., Giménez Morera, M., Burguet, V. Arcenegui., F.A González Peñaloza., F.García Orenes., P, Pereira. (2012). *Tolerancia a la pérdida de suelo: es la tasa máxima de erosión de suelo que permite que se sostenga un alto nivel de productividad. La tolerancia a la pérdida de suelo para un suelo específico se utiliza como una guía para la planificación en la conser.* Cuadernos de Investigación Geográfica, 38, pp. 75-94.

De las Heras, J., Fabeiro, C., Mecho, R. (2003): *Fundamentos de agricultura ecológica: realidad actual y perspectivas.* Ediciones Universitarias de Castilla y la Mancha. Pp. 65

Desir, C. M. & G., s.f. *Procesos de erosión en una zona de clima semiárido de la Depresión del Ebro (Bárdenas Reales, NE de España).* C & G, 24, pp. 63-72.

Desir, G. (2004): *Análisis de la problemática y de la incidencia de la erosión de suelos en Aragón.* En J. Mandado, ed. *Semiárido: Problemática ambiental.* Zaragoza: s.n.

Elorza, M. G. (2001): *Geomorfoogía climática.* s.l.:s.n.

Fernández Gálvez, J. *El recurso suelo-agua en medios áridos y semiáridos.* Departamento Geoquímica Ambiental. Estación Experimental del Zaidín. CSIC. Profesor Albareda 1, Granada, España.

García-Fayos, P. (2004): *Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica.* En: *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante.* Madrid: s.n., pp. 309-334.

García Ruíz, J. M. (2011): *Una revisión de los efectos hidrológicos y erosivos del abandono de tierras en España.* Geographicalia, s 59-60, pp. 125-135

García Ruíz, J.M y López Bermúdez, F. (2009): *La erosión del suelo en España.* Pp 441. Sociedad Española de Geomorfología (SEG)

García-Ruíz, J.M., Jones, J.A.A & Arnáez, J. (2002): *Environmental change and water sustainability.* Pp 340. Instituto Pirenaico de Ecología

González Hidalgo, J. C., Echeverría, M. T., Pellicer, F., Vallejo, R., Bellot., J. (1992): *Pautas espaciales y temporales de la distribución de la erosión hídrica en el sector central del Valle del Ebro.* Estudios de Geomorfología en España, pp. 75-82. En López

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

Bermúdez, F., Conesa García C., Romeo Díaz, M.A. (1992): Estudios de Geomorfología en España. Murcia: Sociedad Española de Geomorfología. Pp. 431

González Hidalgo, J. C. (1998): *Los procesos de erosión del suelo: hechos, mitos y paradojas*. Gographicalia, 36, pp. 47-65

Guerrero Campo, J. (1996-1997): *Procesos erosivos intensos en las áreas marginales de la Depresión del Ebro y el Pirineo. Interpretación de los patrones de la vegetación*. Cuadernos I. Geografía, s 22-23, pp. 57-79.

Guerrero Campo, J. (1998): *Respuesta de la vegetación y de la morfología de las plantas a la erosión del suelo. Valle del Ebro y Prepirineo Aragonés*. pp 257. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón.

Gutiérrez Elorza, F., Gutiérrez, M., Desir, G., Guerrero, J., Lucha, P., Marín, C., García Ruíz, J. M. (2005): *Sixth International Conference on Geomorphology*. Pp 511. Universidad de Zaragoza

Gutiérrez Elorza, M. (2001): Geomorfología climática. pp, 642. Omega, S.A.

Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., y Gisbert Blanquer, J.M, s.f. *La encuación universal de pérdidas de suelo (USLE)*.

Kirkby, M.J y Morgan, R.P.C. (1991): *Erosión de suelos*. México: Limusa.

Lan Li, Shuhan Du, Laoshen Wu, Gangcai Liu. (2009). *An overview of soil loss tolerance*. Catena, pp. 93-99.

Lasanta, T. (2003): *Gestión agrícola*. Zubia, 21, pp. 73-96.

Lasanta, T. (2010): *Pastoreo en áreas de montaña: estrategias e impactos en el territorio*. Estudios Geográficos, Volumen LXXI, pp. 203-233.

Lasanta, T. (2016): *Abandono de cultivos en la región de Murcia: Consecuencias ecogomorfológicas*. Pirineos, p. 263.

Lasanta, T., Begueña, S., García-Ruiz, J.M. (2016): *Geomorphic and hydrological effects of traditional shifting agriculture in a Mediterranean mountain area*.

Lasanta, T., Nadal-Romero, E., Serrano-Muela, P., Vicente-Serrano, S.M y García Ruíz, J.M. (2010): *Escorrentía y erosión tras el abandono de tierras de cultivo en montaña*:

resultados de la estación experimental Valle de Aísa. Pirineos. Revista Ecológica de Montaña, pp. 115-133.

León, J., Badía, D., Echeverría, M.T. (2015): *Comarison of different methods to meausre soil erosion in the central Ebro Valley*. Cuadernos de Investigación Geográfica, 41, pp. 165-180.

López Bermúdez, F., Romero Díaz, A. (1998): *Erosión y desertificación: implicaciones ambientales y estrategias de investigación*. Papeles de Geografía, 28, pp. 77-89.

López Vicente, M., Quijano, M., Palazón, L., Gaspar, L., Navas, A. (2018): *Assessment of soil redistribution at catchment scale by coupling a soil erosion model and sediment connectivity index (Central Spanish Pre-Pyrenees*. Cuadernos de Investigación Geográfica, 41, pp. 127-147.

Mañas, F. M. d. S. O. (2001): *Agricultura y desertificación*. Pp 303. Ediciones Mundi-Prensa Madrid.

Marín, C y Desir, G. (2010). *Procesos de erosión en una zona de clima semiárido de la Depresión del Ebro (Bárdenas reales, NE de España)*. Pp. 63-72.

Miró, M. D. d. (1982): *Desarrollo de zonas áridas y semiáridas: obstáculos y perspectivas*. Barcelona: Serbal.

Montserrat, P y Villar, L. (1999): *Consecuencias ecológicas del abandono de tierras y la despoblación rural*. Instituto Pirenáico de Ecología (CSIC).

Nadal Romero, E., Lasanta, T., González Hidalgo, J. C., García-Ruíz, J. M. (2012): *The effect of intense rainstorm events on the suspended sediment response under various use land uses: the Aísa Valley experimental station*. Cuadernos de Investigación Geográfica, 38, pp. 27-47.

Navas, A. (1995): *Cuantificación de la erosión mediante el radioisótopo cesio 137*. Cuadernos técnicos de la S.E.G, 8, p. 16.

Pennock, D., McKenzie, N. (2015): *Estado Mundial del Recurso Suelo Resumen Técnico*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, 2016

Peña Monné, J.L., Pellicer Corellano, F., Julián Andrés, A., Chueca Cía, J., Echeverría Arnedo, M.T., Lozano Tena, M.V., Sánchez Fabre, M. (2002): *Mapa geomorfológico de*

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

Aragón. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza, 54 pp.

Pérez Cabello, F., Echeverría M., De la Riva, J., Ibarra, P. (2011): *Apuntes sobre los efectos de los incendios forestales y restauración ambiental de las áreas quemadas. Estado de la cuestión y principios generales*. Geographicalia, 59-60, pp. 295-308.

Pérez Cabello, F., Cerdà, A., De la Riva, J., Echeverría, M. T., García-Martín, A., Ibarra, P., Lasanta, T., Montorio, R., Palacios, V. (2010): *Micro-scale post-fire surface cover changes monitored using high spatial resolution photography in a semiarid environment: A useful tool in the study of post-fire soil erosion processes*. Journal of Arid Environments, 76, pp. 88-96.

Pérez Lluch, M.C., Recatalá, L., Calvo, A., Rasal, M., Caselles, A., Sánchez, J. y Ferrer, L. (2003): *Métodos y modelos de evaluación de la erosión hídrica: una revisión de las variables consideradas como base para un planteamiento sistémico en el ámbito mediterráneo*. Revista Internacional De Sistemas, 13, pp. 40-51.

Prats, J. C. (2004): *El clima de Aragón*, Zaragoza: J.L Peña, L.A Longares y M. Sánchez.

Romero Díaz, A. (2003): *Influencia de la litología en las consecuencias del abandono de tierras de cultivo en medios mediterráneos semiáridos*. Papeles de Geografía, 38, pp. 151-165.

Rubio, J. L., Calvo, A. (1996): *Soil degradation and desertification in mediterranean environments*. pp 290. Geoforma.

Ruiz Flaño, P. (1993): *Procesos de erosión en campos abandonados del Pirineo. El ejemplo del Valle de Aísa*. Pp 191. Geoforma Ediciones.

Sala, M., Rubio, J.L., García Ruíz, J.M. (1991): *Soil Erosion Studies in Spain*. Pp 228. Logroño: Geoforma Ediciones.

Sebastián, M., Sesé, P., Echeverría, M. T., Lastanta, T., Pérez-Cabello, F., Ibarra, P., De la Riva, J. (2008): *Factores ambientales que controlan la producción de escorrentía y sedimento en el matorral semiárido del sector central de la Depresión del Ebro (Bajo Valle del Gállego, Zaragoza). El papel de la pedregosidad, la vegetación y el suelo*. Geographicalia, 54, pp. 85-97.

Erosión hídrica en Aragón: una revisión bibliográfica

Stocking, M y Murbaghan, N. (2001): *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra*. Madrid, Barcelona, México : Mundi-Prensa.

Tánago, M. G. d. (1991): *La ecuación Universal de Pérdidas de Suelo*. Ecología, 5, pp. 13-50.

UNESCO (1982): Desarrollo de tierras áridas y semiáridas: obstáculos y perspectivas. Ediciones del Serbal, Roger de Flor, 172 – Barcelona-I 3. Pp. 87

Valen, G. D. (2001): *Erosión hídrica de terrenos yesíferos en el sector central de la Depresión del Ebro*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón (C.S.I.C., Universidad de Valencia y Generalitat Valenciana).

Verheijen, F. G. A., Jones, R. J. A., Rickson, R. J., Smith, C. J. (2009): *Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe*. Earth-Science Reviews, 14, pp. 23-38.