

# AVANZANDO SOBRE EL CÓMO, EL DÓNDE Y EL POR QUÉ DE LOS PROBLEMAS DEL AGUA EN AMBIENTES SEMIÁRIDOS: LOS SERVICIOS DE LOS ECOSISTEMAS COMO APROXIMACIÓN.

Antonio J. Castro<sup>1, 2</sup>, Cristina Quintas-Soriano<sup>2</sup>, Marina García-Llorente<sup>3</sup>, Javier Cabello<sup>2</sup>, Hermelindo Castro<sup>2</sup>

1. Oklahoma Biological Survey, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, 73019, USA.

2. Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG), Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Almería, 04120 Almería, España.

3. Laboratorio de Socioecosistemas, Universidad Autónoma de Madrid, Darwin, 2. Edificio Biología, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, España.

E-mail: [acastro@ual.es](mailto:acastro@ual.es), [cquintassoriano@gmail.com](mailto:cquintassoriano@gmail.com), [marina.garcia@uam.es](mailto:marina.garcia@uam.es), [jcabello@ual.es](mailto:jcabello@ual.es), [hcn068@ual.es](mailto:hcn068@ual.es).

## 1. Gestionando el Cambio Global en el semiárido: el proyecto GLOCHARID

La comunidad científica, y cada día más internalizado por toda la sociedad, visualiza el Cambio Global como el cambio predominante que está experimentando el Sistema Tierra y su funcionamiento, derivado del impacto humano sobre el planeta (Duarte, 2006; OSE, 2010). Dichos cambios se están produciendo tanto de forma directa debido a los efectos de la contaminación, sobreexplotación, introducción de especies invasoras, cambio climático y usos del suelo; como de forma indirecta por cambios socio-políticos, culturales y demográficos entre otros. El Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG), representa un espacio de investigación multidisciplinar en donde el ámbito universitario-científico, el empresarial y el de la gestión, trabajan de manera conjunta para la identificación, evaluación y seguimiento de la vulnerabilidad y adaptación de la biodiversidad y ecosistemas de Andalucía a los efectos potenciales del Cambio Global. A partir de ahí, surge la puesta en marcha del proyecto de investigación GLOCHARID "Diseño experimental de indicadores y metodología del programa de seguimiento de los efectos del Cambio Global en zonas áridas y semiáridas del levante andaluz". El proyecto está compuesto por un total de 10 líneas de trabajo con especialistas de distintas disciplinas (abordando aspectos como el clima, hábitats y ecosistemas, medio biológico, Ciencias de la Sostenibilidad, entre otros temas). Se parte de una filosofía en donde los equipos de trabajo, tanto científicos como profesionales del ámbito de la gestión, participan de forma activa y coordinada en la transferencia de conocimientos desde la interfaz ciencia-gestión; es decir, una hacia el ámbito gestor, buscando el lado útil y aplicado de la investigación; y otra hacia el ámbito de la sociedad y de una manera más divulgativa.

Este artículo aborda la línea de trabajo centrada en las Ciencias de la Sostenibilidad (siendo esta una ciencia interdisciplinaria enfocada al entendimien-

to de las dinámicas que subyacen a los sistemas ser humano-naturaleza o socio-ecosistemas) y la aplicación del marco de servicios de los ecosistemas. De manera más concreta, y asumiendo los cambios en los usos y coberturas del suelo como uno de los principales impulsores directos de cambio (Pereira et al. 2012), y más aun en sistemas mediterráneos semiáridos (EME 2011), el objetivo principal es caracterizar los efectos (positivos y negativos) que diferentes escenarios de uso del suelo provocan en el suministro de servicios de los ecosistemas, evaluando así los aportes socioeconómicos y ambientales que la sociedad recibe. Esto implicó el desarrollo de un marco conceptual y metodológico (Figura 1) que permitiera primero, inferir el efecto del los cambios en el uso del suelo en el suministro de servicios, y en segundo lugar, realizar una valoración integral de los compromisos entre el suministro y la demanda social de servicios. Así, en este proyecto se busca una fuerte interacción de las disciplinas biofísicas y sociales, realizando una valoración ecológica y socio-cultural de los servicios.

Los objetivos específicos fueron a) identificar los servicios suministrados por los ecosistemas semiáridos con mayor relevancia en el bienestar en la zona, b) identificar y caracterizar los cambios en los usos y coberturas del suelo más destacados en las últimas décadas, c) caracterizar la distribución espacial del suministro, d) valorar la demanda social a través del análisis de preferencias sociales, y e) hacer un análisis de integración. En este artículo se pretende hacer una introducción general a algunos de los principales resultados obtenidos. A continuación se describe la zona de estudio y se presentan los resultados sobre los servicios de los ecosistemas considerados como más vulnerables debido a los efectos que distintos usos y coberturas del suelo provocan, profundizando en particular en el servicio de regulación hídrica, tanto por su vulnerabilidad como por su importancia en la regulación de la recarga potencial de acuíferos en sistemas semiáridos.

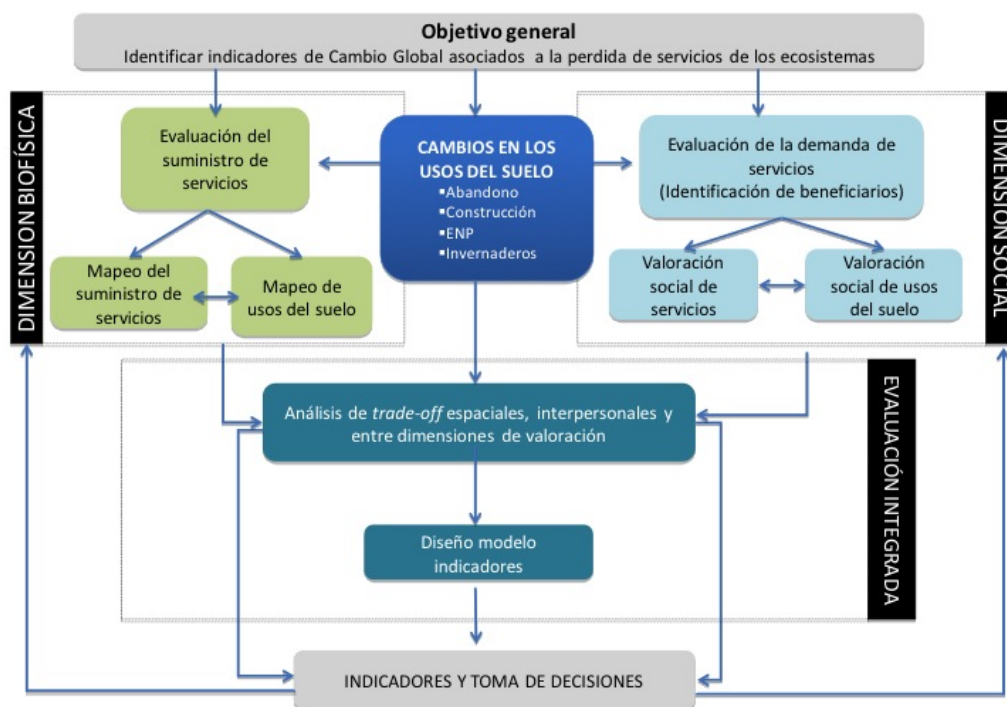


Figura 1. Esquema del marco conceptual de servicios, el objetivo general, y la relación entre los distintos objetivos específicos planteados.

### Zona de estudio, usos y coberturas del suelo predominantes, y servicios de los ecosistemas.

El área de estudio, con una extensión de 1.220.711 ha, se encuentra localizada en el sureste de la Península Ibérica (Figura 2). Esta región, considerada la más árida de todo el continente europeo (Armas et al. 2011), limita al Norte por la Sierra de Cazorla y Sierra de Segura y las Villas, por el límite provincial de la región de Murcia, al Sur y al Este por el mar Mediterráneo, y al Oeste por Sierra Nevada y Sierra Mágina. Se caracteriza por una gran heterogeneidad topográfica y con un marcado gradiente altitudinal que oscila desde los 0 m en la franja litoral sur hasta los 2040 m de máxima cota de altitud. El clima predominante es mediterráneo cálido y seco, con temperaturas medias anuales entre los 12 y 15 grados centígrados, y con una precipitación anual menor a 350 mm en casi todo el territorio, pudiendo ser en algunas zonas menor de 200 mm (Armas et al. 2011). Para la investigación, la zona se ha dividido en cinco ecorregiones homogéneas utilizando como cartografía de referencia el mapa de ecorregionalización de la RENPA (Montes et al. 1998). Esta ecorregionalización representa una sectorización de Andalucía con base ambiental y a diferentes escalas espaciales. Asumiendo la escala de ecoprovincia como la más adecuada para el objetivo de estudio, se definieron 5 ecoprovincias en el área de estudio: alta montaña bética, media montaña bética subhúmeda, media montaña bética seca, cuencas internas orien-

tales y litoral mediterráneo subdesértico. A partir de ellas y para facilitar el muestreo social se caracterizaron y agruparon 5 ecorregiones finales: litoral protegido (referido al Parque natural Cabo de Gata-Níjar), litoral no protegido (resto del litoral), sierras próximas al litoral (referida a media montaña bética seca al sur de Almería), Almanzora (media montaña bética seca al norte de Almería) y valles internos (referida a cuencas internas orientales).

A nivel socio-económico, el área cuenta con 178 municipios (94 de Almería, 72 de Granada, 7 de Jaén y 5 de Murcia), siendo incluidos tanto de forma total o parcial y con una población total del área de estudio de 1.090.760 habitantes. Los aprovechamientos principales de la zona han sido la agricultura tradicional, especialmente el esparto y minería de plomo. Actualmente, los usos y coberturas del suelo y actividades económicas imperantes son la agricultura intensiva localizada en el poniente almeriense con toda su industria paralela, el turismo y el sector servicios atraídos por las áreas protegidas tanto costeras como de montaña y la Alpujarra, y la industria asociada a la explotación de las canteras de mármol (Sánchez-Picón et al. 2011). Así, los usos y coberturas del suelo incluidos en este trabajo son: intensificación agraria a través de invernaderos, procesos de urbanización, abandono rural, y superficie destinada a la conservación a través de espacios naturales protegidos (ENP).

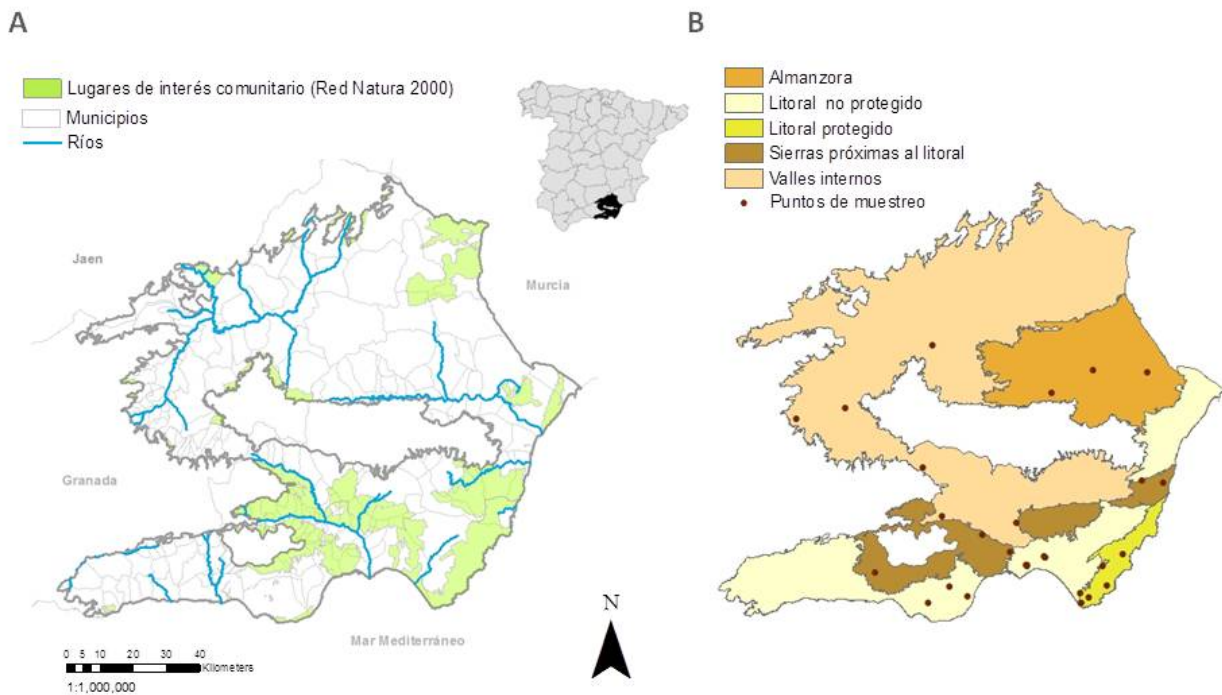


Figura 2. Localización de la zona de estudio donde se muestran: (A) límites municipales del área de estudio, lugares de interés comunitario (LICs) y principales vías fluviales, y (B) ecorregiones delimitadas y puntos de muestreo social.

Los servicios de los ecosistemas estudiados fueron elegidos siguiendo; (1) un balance entre las distintas tipologías de servicios (abastecimiento, regulación y culturales), (2) aquellos servicios específicos identificados en estudios previos como importantes en los sistemas semiáridos (Castro et al. 2011) y, (3) servicios de los ecosistemas fuertemente relacionados con los usos o coberturas del suelo predominantes en el sureste semiárido y que están viéndose afectados (tanto en su suministro como en la demanda social) por los mismos (García-Llorente et al. 2012). Siendo estos: alimento procedente de la agricultura tradicional e intensiva, regulación del clima, calidad del aire, regulación hídrica, protección del suelo y control de la erosión, turismo de naturaleza, rural y/o playa, e identidad cultural. Tanto dichos servicios como los usos y coberturas del suelo han sido caracterizados y cuantificados mediante el uso de modelos espaciales y explícitos que, a través de información digital ofrecida por la REDIAM (Red de Información Ambiental de Andalucía), permitieron caracterizar la provisión de los servicios y los efectos provocados por los usos y coberturas de suelo. Por otro lado, la dimensión social fue abordada a través de un muestreo realizado a la población local y turista (N=563; Feb-Abril 2012), un taller de expertos con gestores e investigadores del

medio ambiente (N = 21; Octubre 2012) y datos de consumo de agua en la zona.

### ¿Cómo es el efecto de los usos y coberturas del suelo sobre el suministro de servicios?

Según los resultados obtenidos, la población percibe un deterioro generalizado de todos los servicios de regulación, con especial atención a la regulación hídrica entre ellos (Figura 3). Además, existe un deterioro de servicios de abastecimiento tradicionales (agricultura tradicional) mientras se mantiene el auge de los servicios de abastecimiento tecnificados (agricultura intensiva). Con respecto los servicios culturales, el turismo también mejora notablemente (tratándose este generalmente de un servicio demandado por la población urbana). Estas tendencias son coherentes con las encontradas en la Evaluación de los Ecosistemas de España (EME 2011). Durante el taller de expertos realizado, se detectó que los problemas de sobreexplotación del entorno a través de la agricultura intensiva, y el desacoplamiento entre la escala en la que los procesos ecológicos se producen y en la que son gestionados son problemas que afectan gravemente a la regulación hídrica.

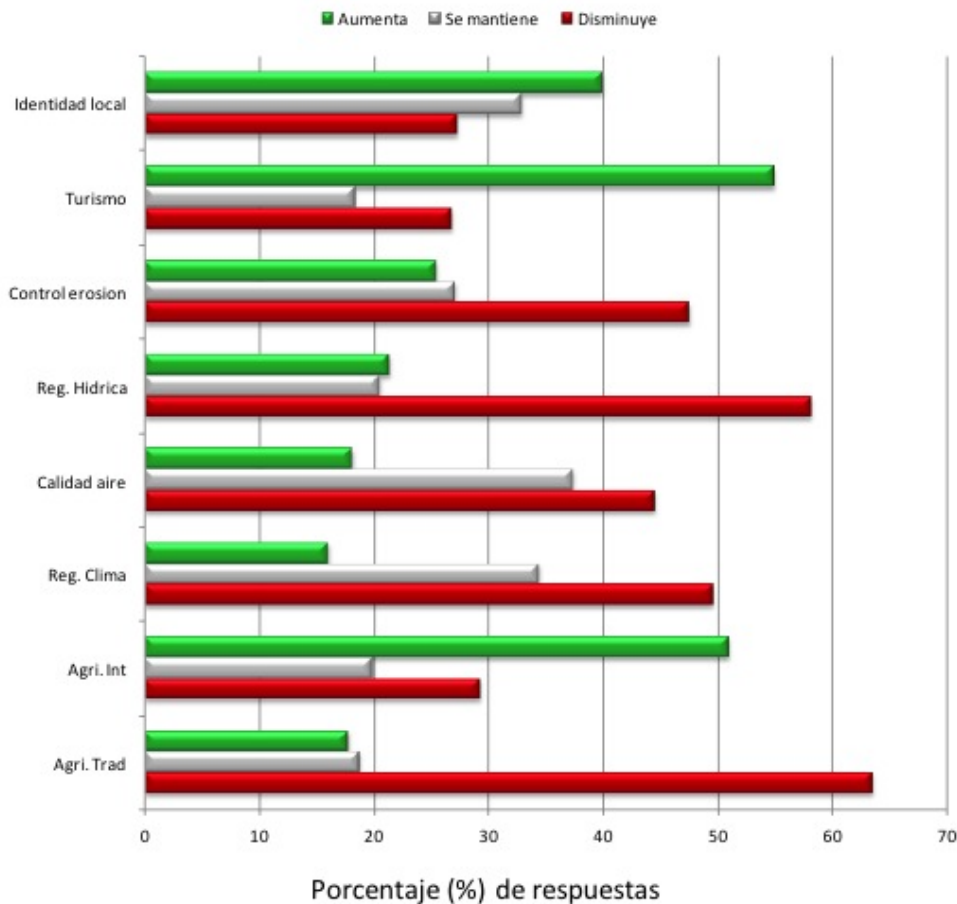


Figura 3. Tendencia del estado de los servicios de los ecosistemas en porcentaje (%) de respuestas. .

En relación con el impacto agregado de los usos del suelo sobre el suministro de servicios, el abandono rural fue el que recibió puntuaciones más negativas, seguido del efecto de los invernaderos y la construcción. La superficie destinada a ENP recibió puntuaciones positivas en cuanto a su papel en el suministro de servicios. La superficie destinada a invernadero constituye una de las principales transformaciones en toda Europa en la tercera parte del siglo XX. De hecho, el Campo de Dalías contiene el 50% de los invernaderos del sur peninsular (Sánchez-Picón et al. 2011). Esto a priori supone un impacto directo y positivo en agricultura intensiva, pero un detrimento sobre otros servicios, en concreto, la regulación hídrica, el control de la erosión, la agricultura tradicional, y el turismo se detectaron como fuertemente afectados (Figura 4). Por otro lado, Almería es una de las provincias con mayor transformación del territorio por urbanización, muchas veces costera (con repercusión sobre el control de la erosión fundamentalmente). Mientras, en las zonas más montañosas, rurales y aisladas se produce el efecto inverso y con tendencia hacia el abandono. De hecho, gran parte de los municipios declarados en el Programa de Desarrollo Rural Sostenible (MARM 2010) como municipios

“a revitalizar de primer nivel de prioridad” en las zonas de: La Alpujarra, Sierra de Filabres-Alhamilla, y Hoyas de Guadix y Baza se incluyen en este estudio (más del 50% de los 178 municipios del estudio se encuentran en dicha situación). Según los resultados obtenidos, los servicios más perjudicados por dicha tendencia son la agricultura tradicional, identidad local, el control de la erosión y el turismo (Figura 4). Por último, los ENP suponen un impacto directo sobre el mantenimiento de valores de referencia para servicios de los ecosistemas y el funcionamiento de los ecosistemas y los procesos que determinan en último término el suministro de servicios de regulación. Así, los resultados muestran que el servicio más inhibido por el ENP es la agricultura intensiva; mientras que los más potenciados fueron los servicios de regulación (la regulación del clima y calidad del aire) y el servicio de turismo (Figura 4). Así, las áreas protegidas destacan por ser zonas donde no sólo se promueven las políticas de conservación (Rodríguez-Rodríguez et al. 2011), sino también como potencial de mantener los servicios de regulación en niveles de referencia y favorecer un flujo diverso de los mismos.

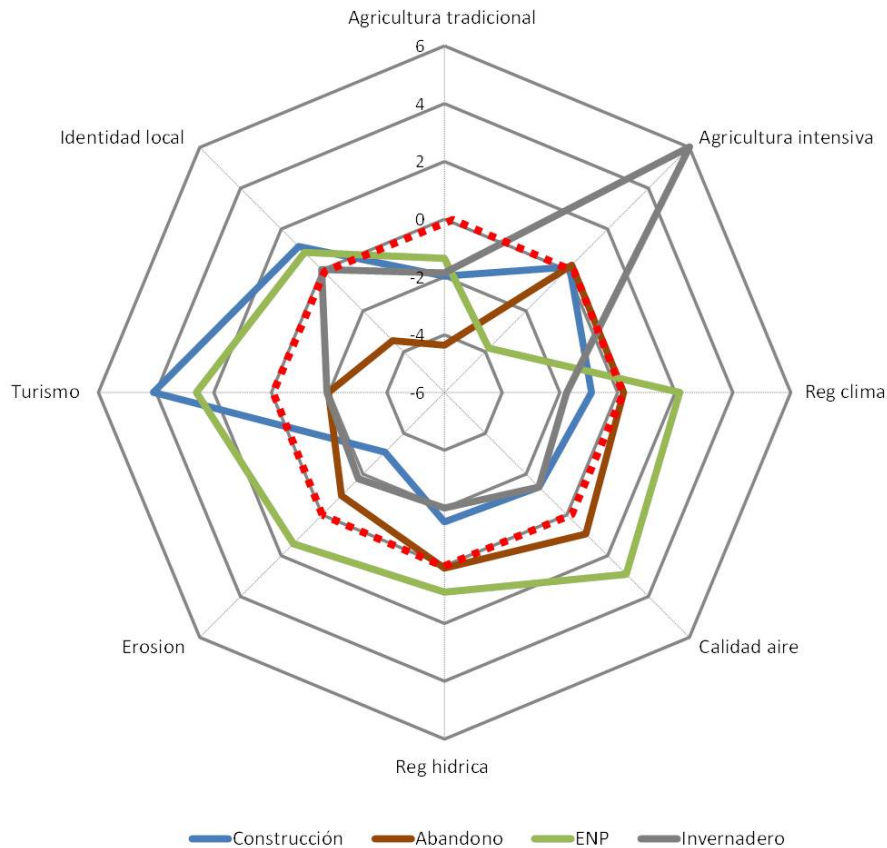


Figura 4. Relación del impacto de los usos del suelo sobre el suministro de servicios. La línea roja punteada marca el umbral entre los valores que potencian (valores positivos de 0 a 6 y exterior de la zona punteada) y los que inhiben (valores negativos de 0 a -6 e interior de la zona punteada).

### ¿Dónde y por qué se conserva el servicio de regulación hídrica en los sistemas semiáridos?

El consumo de agua por parte de la población en la cuenca alta y media del Río Adra es mucho menor que el suministro de la misma procedente tanto por el flujo de agua azul como de agua verde. Sin embargo, el consumo de agua en la cuenca baja (que corresponde con los municipios de Adra, Berja y Dalías) excede el flujo de agua verde y azul en esa región (Figura 4a). De hecho, la parte baja es la zona que consume más agua en toda la cuenca del Río Adra, y es precisamente donde se da menor flujo tanto de agua azul como de agua verde, existiendo por tanto un desacoplamiento entre el suministro del servicio agua para consumo humano y su demanda por parte de la sociedad. Por otro lado, en la cuenca del Río Nacimiento (Figura 4b) se observa que salvo en el municipio de Abla, el consumo de agua para uso humano y riego es menor que el suministro procedente del flujo azul y del flujo verde. De hecho, la parte baja de la cuenca es la zona que menor flujo de agua verde y azul tiene y que menos uso de agua realiza.

Asimismo, los indicadores de vulnerabilidad de servicios de los ecosistemas muestran que la parte baja de la cuenca del Río Nacimiento percibe que el

servicio de agua para consumo es muy vulnerable en la zona, frente al resto de la cuenca que no lo consideran tan vulnerable (Figura 5).

La regulación hídrica representa uno de los servicios más importantes suministrados por los ecosistemas semiáridos. Esto se debe a que, procesos como la recarga de acuíferos, constituyen la principal fuente de agua disponible para cubrir las necesidades humanas y mantener su bienestar (Falkenmark 2003). La recarga de acuíferos se define como el proceso por el que agua procedente del exterior es primero infiltrada y posteriormente recargada por sistemas acuíferos (Andreo et al. 2008). Su cuantificación resulta un proceso de enorme dificultad debido a la alta variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, la heterogeneidad del terreno y las diferentes condiciones de la cobertura vegetal de la superficie (Wilson y Guan 2004). Todo ello hace que, en ecosistemas semiáridos, la caracterización y cuantificación del mantenimiento de los servicios del agua resulte de vital importancia y constituya una prioridad debido a su papel como limitante en estos sistemas.

En este artículo se realiza una estimación de la recarga potencial de acuíferos mediante el modelo APLIS (Andreo et al. 2008). Este modelo se basa en



una ecuación empírica que implementa, a través del uso de un sistema de información geográfica (SIG), algunas de las principales variables implicadas en el proceso de recarga (altitud, pendiente, litología, infiltración y suelos). A través de la ecuación APLIS es posible obtener un mapa de la distribución espacial de la recarga como porcentaje de la precipitación media anual que es infiltrada. Por otro lado, asumiendo las elevadas tasas de la evapotranspiración en las zonas semiáridas, (pudiendo alcanzar valores que oscilan entre 1000 y 1500 mm; Armas et al. 2011), en este estudio los valores de precipitación media fueron corregidos mediante la ecuación de Budyko (1974) y un factor de corrección obtenido para zonas semiáridas del sureste ibérico (España Ramírez 2012). Esto permitió convertir la cobertura de precipitación media anual en un mapa de lluvia útil. A su vez, para realizar una valoración integrada y complementar la información del suministro, estimamos el consumo de agua para cada ecorregión a partir de datos obtenidos del Sistema Multiterritorial de Andalucía (SIMA). De este modo, fue posible explorar posibles compromisos en el servicio de regulación hídrica entre el suministro (recarga potencial de acuíferos) y la demanda social (consumo de agua) (Figura 5). En general, los resultados muestran que la recarga potencial se distribuye de forma heterogénea por todo el área de estudio, siendo la ecorregión de valles internos la que mayor tasa de recarga potencial acumula (97.38

hm<sup>3</sup>/año), y el litoral protegido la que menos (1.03 hm<sup>3</sup>/año). El resto de ecorregiones obtuvieron valores medios, litoral no protegido (30.05 hm<sup>3</sup>/año), seguido de Almanzora (17.29 hm<sup>3</sup>/año) y sierras próximas al litoral (17.05 hm<sup>3</sup>/año). El consumo total de agua para el área de estudio fue de 1852.03 hm<sup>3</sup>/año, siendo el litoral no protegido (1021.50 hm<sup>3</sup>/año) y valles internos (795.80 hm<sup>3</sup>/año) las ecorregiones más consumidoras (97 % del consumo total del área de estudio). El análisis de compromisos entre la recarga y consumo de agua mostró una relación a favor del consumo de agua en todas las ecorregiones, excepto en sierras próximas donde las estimaciones de recarga superaron los valores de consumo. Estas relaciones muestran como se produce un desacoplamiento espacial entre la capacidad biofísica del sistema para suministrar el servicio y la demanda que se produce, ya que el consumo supera a los valores de recarga (Figura 5). Estos desequilibrios se encuentran más acentuados en litoral no protegido y valles internos, ecorregiones con las mayores tasas de recarga, y donde se muestran valores del ratio consumo/recarga más elevados (33.99 y 8.17 respectivamente). En el resto de ecorregiones esta relación osciló en torno a 1, poniendo de manifiesto un desacoplamiento menos acentuado entre la demanda y la provisión del servicio, y pudiendo ser consideradas como zonas más próximas a un equilibrio ambiental de este servicio.

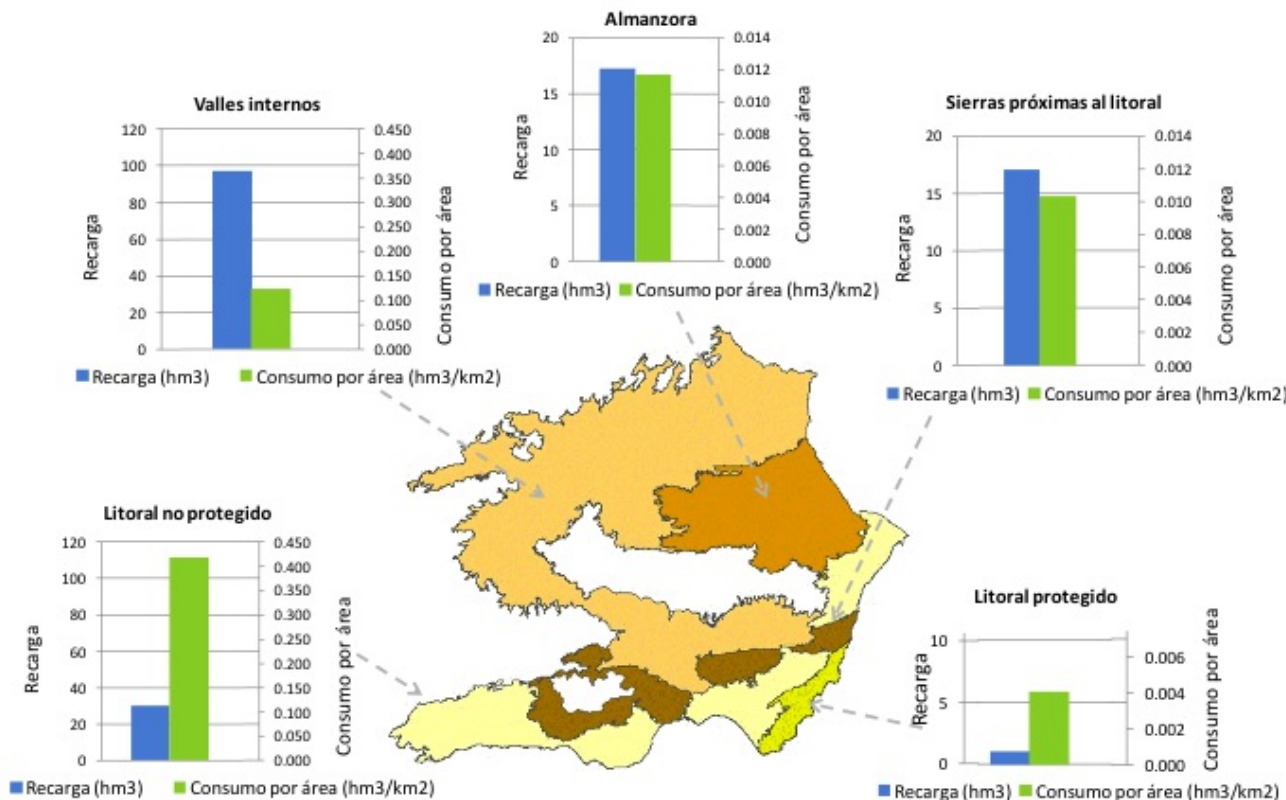


Figura 5. Análisis de compromisos a nivel de ecorregión entre la recarga potencial de acuíferos y el consumo total por área.

## Discusión.

Desde el Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG), el proyecto GLOCHARID avanza en el desarrollo de una valoración integral (desde su suministro a la demanda social) de los servicios suministrados por los ecosistemas semiáridos del sureste ibérico. Este artículo proporciona resultados útiles para la identificación de posibles compromisos en el binomio suministro-demanda, haciendo especial énfasis en el análisis sobre el efecto de los usos y coberturas del suelo tienen sobre el suministro de servicios. Los resultados muestran como la población percibe un deterioro generalizado de la agricultura tradicional y de todos los servicios de regulación, con especial atención en el servicio que regula la recarga de acuíferos. En relación con el impacto que los usos y coberturas del suelo generan sobre el suministro de servicios, el abandono rural y la agricultura de invernaderos fueron los considerados como más perjudiciales mientras que la superficie destinada a ENP recibió las valoraciones más positivas. Por último, el análisis de compromisos entre el suministro y demanda de agua, identificó las ecorregiones de litoral no protegido y los valles internos como las regiones en las que existe un mayor desacoplamiento ambiental, enfatizando así la necesidad de medidas que aporten soluciones a los compromisos encontrados entre el agua que los ecosistemas suministran a través de la recarga y la que es demandada por el consumo y actividades humanas.

## Agradecimientos:

Queremos dar las gracias a todas las personas que han dedicado su tiempo, ilusión y conocimientos participando en las encuestas y talleres. También a M. Wit, M. Astudillo, N. Rubia, P. Águila, M. Sánchez, D. Benzal, J.L. Sánchez Ávila, J. Rubio, Sánchez Martos, etc. por su contribución en los muestreos. Gracias también a A. Pulido, S. España, J. Gisbert y C. Oyonarte por sus útiles comentarios sobre el modelo de recarga. Los fondos para esta investigación fueron obtenidos por el proyecto GLOCHARID financiado por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

## Referencias

- Andreo B, Vías J, Durán JJ, Jiménez P, López-Geta JA, Carrasco F. 2008. Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hidrogeology Journal* 16: 911-925.
- Armas C, Miranda J.D, Padilla FM., Pugnaire FI. 2011. Special issue: The Iberian Southeast. *Journal of Arid Environments* 75: 1241-1243.
- Budyko MI. 1974. *Climate and Life*. Academic

Press, New York.

- Castro AJ, Martín-López B, García-Llorente M, Aguilera PA, López E, Cabello J. 2011. Social preferences regarding the delivery of ecosystem services in a semiarid Mediterranean region. *Journal of Arid Environments* 75: 1201- 1208.
- EME, Evaluación de Ecosistemas del Milenio en España. 2011. *Evaluación de Ecosistemas del Milenio en España – Gestionando la Biodiversidad y los Servicios de los ecosistemas para el bienestar humano*. Fundación Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- Duarte C. 2006. *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Madrid, CSIC.
- España-Ramírez, S. 2012. *Aplicación de SIG para la evaluación del Balance Hídrico en zonas semiáridas. El caso de la cuenca del río Almanzora*. Tesis doctoral. Universidad de Almería.
- Falkenmark, M. 2003. Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. *Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences* 358, 2037–2049.
- García-Llorente M, Martín-López B, Nunes PALD, Castro AJ, Montes C. 2012. A choice experiment study for land use scenarios in semi-arid watershed Environments. *Journal of Arid Environments* 87, 219-230.
- Montes C, Borja F, Bravo MA, Moreira JM. 1998. Reconocimiento biofísico de espacios Naturales Protegidos, Doñana: una aproximación ecosistémica. *Consejería de Medio Ambiente*.
- OSE, Observatorio de la sostenibilidad en España, 2010. *Biodiversidad en España base de la sostenibilidad ante el cambio global*. OSE, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Fundación Biodiversidad, Fundación Universidad de Alcalá. Madrid.
- Pereira HM, Navarro LM, Santos Martins I. 2012. Global biodiversity change: the bad, the good and, the unknown. *Annu. Rev. Environ. Resourc.* 37, 25-50.
- Rodríguez-Rodríguez D, Bomhard B, Butchart, SHM, Foster MN. 2011. Progress towards international targets for protected area coverage in

mountains: A multi-scale assessment. *Biological Conservation* 144, 2978–2983.

- Sánchez-Picón A, Aznar-Sánchez JA, García-Latorre J. 2011. Economic cycles and environmental crisis in arid southeastern Spain. A historical perspective. *Journal of Arid Environment* 75, 1360-1367.

- Wilson JL, Guan H. 2004. Mountain-block hydrology and mountain-front recharge, in *Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United States*. Water Science and Application Series 113-137.