

USO DEL NDVI COMO TRAZADOR DEL IMPACTO HIDROLÓGICO LOCAL DE LAS ACEQUIAS HISTÓRICAS DE SIERRA NEVADA Y DE ESTADOS CRÍTICOS EN LA CONTRIBUCIÓN HIDROLÓGICA DE LA NIEVE

J. Aparicio^{1,2}, R. Pimentel^{1,2}, P. Torralbo^{1,2} y M.J. Polo^{1,2}

¹Grupo Dinámica Fluvial e Hidrología, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA). Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo da Vinci, Área de Ingeniería Hidráulica, 14071, Córdoba. g22apibj@uco.es, rpimentel@uco.es, p12tomup@uco.es, mjpolo@uco.es

²Departamento de Agronomía, Unidad de Excelencia María de Maeztu (DAUCO). Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo da Vinci, Área de Ingeniería Hidráulica, 14071, Córdoba.

RESUMEN. La extensa red de acequias existente a lo largo de toda Sierra Nevada divididas entre las de careo y las de riego conforman un entramado trazado de más de 750 km. El aumento de la humedad en las zonas de influencia de las acequias provoca, además, un desarrollo diferencial de la vegetación que permite utilizar esta como trazador indirecto de los gradientes locales de disponibilidad de agua en el suelo. El objetivo de este trabajo es evaluar el rol hidrológico de las acequias en la humedad del suelo colindante a las acequias. Para ello, se utiliza el NDVI obtenido de una colección de imágenes Landsat durante el periodo 1984-2017. Los resultados mostraron la capacidad del NDVI para identificar las zonas de influencia de las acequias y la diferente respuesta del NDVI dependiendo las características morfológicas y de uso de la zona colindante a las acequias.

ABSTRACT. The extensive network of irrigation ditches throughout the Sierra Nevada, divided into careos ditches and irrigation ditches, make up a network of more than 750 km. The increase in humidity in the areas of influence of the irrigation ditches also causes a differential development of vegetation that allows the vegetation to be used as an indirect tracer of the local gradients of water availability in the soil. The aim of this work is to evaluate the hydrological role of irrigation ditches on soil moisture adjacent to these ditches. For this purpose, NDVI obtained from a collection of Landsat images during the period 1984-2017 is used. The results showed the capacity of the NDVI to identify the zones of influence of the irrigation ditches and the different response of the NDVI depending on the morphological and use characteristics of the area surrounding the irrigation ditches.

1.- Introducción

En regiones montañosas del mediterráneo, los sistemas tradicionales de riego aún persisten en áreas donde la modernización no ha llegado, bien sea, por el alto coste económico de su implantación, o bien, por no lograr ser del todo operativos. Motivos como la compleja orografía

de los sistemas montañosos o la baja productividad de sus explotaciones agrícolas hacen imposible la modernización de los sistemas de regadío con sistemas de presión (Ron 1985, Crook & Jones, 1999, Molle & Sanchís-Ibor, 2019). Este es el caso de la extensa red de acequias del Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada, en el sureste de España. Este antiguo sistema de recarga y distribución de agua, cuyos orígenes algunas fuentes datan de la época romana, alcanzó su máximo apogeo durante la ocupación musulmana (Delaigue, 1995).

Este sistema de gestión hídrica, que utiliza soluciones basadas en fundamentos naturales, ha demostrado su utilidad a lo largo de siglos y por tanto cabría pensar en su resiliencia ante escenarios futuros de cambio asociados al calentamiento global (Beckers et al. 2013, Martín Civantos, 2006). El sistema está formado por una red de más de 750 km (Cano-Manuel y Ortiz, 2010) de acequias divididas en 2 tipos, las de careo y las de regadío.

Las primeras, las de careo, recogen el agua de fusión de la nieve y, la infiltran a lo largo de su recorrido o la redirigen a zonas de capacidad de infiltración alta llamadas simas o chorreras, generalmente zonas de roca metamórfica muy alterada.

El otro tipo importante de acequia existente en la red son las llamadas acequias de riego. Estas acequias son aquellas se encuentran generalmente en cotas más bajas que las de careo y, permiten el riego de las parcelas agrícolas, bien sea reconduciendo el agua directamente de la fusión de la nieve o bien comunicando las surgencias naturales hacia las zonas de interés.

Desde 2014, como parte de una de las actividades promovidas por el proyecto MEMOLA, *Mediterranean Mountainous Landscapes*, muchas de las acequias de la zona han sido restauradas o recuperadas.

Este sistema de acequias altera la distribución natural del agua en la cuenca, no sólo derivando agua de su curso natural sino favoreciendo condiciones más húmedas del suelo en sus zonas aledañas y consecuentemente dando lugar a la aparición de ecosistemas asociados. La vegetación juega un papel clave en estos ecosistemas siendo el balance de agua el factor más condicionante en su estado a diferencia de lo observado en otras latitudes más boreales donde factores como la radiación o la insolación toman mayor

importancia. Por tanto, conocer el contenido de agua en estas zonas es clave desde el punto de vista ecosistémico.

Si bien la caracterización del contenido de agua de un suelo es asequible a escala reducida mediante campañas continuas de monitoreo o instalación de sensores automáticos, las extensiones mayores y la gran heterogeneidad del suelo en los sistemas de alta montaña tanto en estructura como composición, hacen ineficiente la monitorización in situ o la extrapolación de valores obtenidos en puntos de control para toda el área. En la actualidad el desarrollo de nuevas tecnologías satelitales ha permitido el uso de información obtenida mediante teledetección con una mayor resolución espaciotemporal. Si bien el uso de información satelital en la región de las microondas en la más extendida, ésta posee grandes limitaciones al estudiar áreas de topografía complejas. Se hace necesario en estos casos tratar de buscar un factor estrechamente ligado con la humedad del suelo para inferir su valor. Este es el caso del uso del estado de la vegetación a final del año hidrológico como indicador indirecto del contenido de agua en el suelo y a su vez de cuáles han sido las condiciones hidrológicas del año hidrológico que termina (Ellis et al., 2009; Gómez-Giráldez et al., 2014). Además, la comparación de estos estados finales entre diferentes años nos permite observar tendencias y/o umbrales de las relaciones entre precipitación, y el estado de la cubierta vegetal y contenido de agua en el suelo.

En la literatura científica pueden encontrarse múltiples estudios sobre el uso de aplicaciones basadas en índices espectrales para el seguimiento de indicadores eco-hidrológicos (Courault et al., 2005, Glenn et al., 2009, González-Dugo et al. 2013). Para medir la vigorosidad de la vegetación y sus cambios temporales se suele utilizar el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), (Tucker, 1979), un índice adimensional basado en una operación entre valores de reflectancias en distintas bandas del espectro electromagnético. Por un lado, la reflectancia en la región del rojo (aprox. 680 nm) debido a los pigmentos fotosintéticos, y, en segundo lugar, la reflectancia en el infrarrojo cercano (aprox. 750 nm) debido a la estructura celular de las hojas. Valores en el NDVI positivos y cercanos a 0 indican vegetación débil o incipiente y los cercanos a 0.6 vigorosidad y alta producción de biomasa.

Existen muchas constelaciones de satélites midiendo en el óptico con diferentes resoluciones espaciotemporales. Si bien, desde 2015 están disponibles series con mejores resoluciones temporales y espaciales para el seguimiento de áreas heterogéneas (como es Sierra Nevada), como es la constelación Sentinel, para el análisis a medio plazo histórico, Landsat, de resolución 30x30m, cuyos primeros satélites fueron lanzados en la década de los 70 ofrece la mejor resolución espacial para zonas heterogéneas con una frecuencia temporal apropiada para este tipo de estudios.

Con todo lo comentado anteriormente, el objetivo principal de este estudio es evaluar el rol hidrológico de las acequias en zonas de alta montaña, concretamente en el área de Sierra Nevada. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la evolución temporal de la vegetación a través de su vigorosidad en las zonas de influencia de las acequias en toda el área de Sierra Nevada., determinando si las características de las acequias influyen de distinta manera en la vegetación colindante y consecuentemente en el estado de humedad del suelo en toda el área de Sierra Nevada.
- Analizar los beneficios medioambientales de la restauración de las acequias que se están llevando a cabo. Se analizará este efecto en la acequia de Barjas en el término municipal de Cañar.

2.- Zona de estudio

Este trabajo aborda dos escalas espaciales de estudio. Una primera escala, en la que los resultados van a estar centrados en el área de Sierra Nevada determinada por sus cinco cuencas de cabecera (escala global) y, una segunda a escala más reducida, utilizando como zona piloto la acequia de Barjas (escala local o de acequia).

2.1. Escala Global: Sierra Nevada

Sierra Nevada es el sistema montañoso más meridional en el continente europeo a tan solo 30 km de distancia del Mar Mediterráneo con una longitud aproximada de 80 km en la dirección Este - Oeste y de entre 15-20 km, según zonas, en la dirección Norte - Sur con un área de más de 2000 km² (Fig. 1). El rango de altitud se encuentra entre los 950 y 3479 m s.n.m. En cuanto al clima, se trata de una combinación de clima alpino, en cotas altas, con clima mediterráneo, en cotas bajas. Para el periodo desde 1961 hasta 2015, el régimen pluviométrico es bastante oscilante, llegando a alcanzar valores anuales de precipitaciones en años húmedos de más de 1000 mm y de apenas 200 mm en años secos, con una precipitación media anual en el periodo completo de 526.20 mm al año (Pérez-Palazón, 2019). En relación con las temperaturas, los valores medios anuales de máximas, medias y mínimas diarias en el mismo periodo de tiempo han sido de 20.60, 13.39 y 7.94 °C respectivamente (Pérez-Palazón et al. 2015). La precipitación anual en forma de nieve alcanza valores medios de 76.6 mm para el periodo comentado anteriormente. Los eventos se hacen frecuentes año tras año por encima de la cota 1000 m.s.n.m., encontrándose a partir de los 2000 m.s.n.m. una capa de nieve persistente entre los meses de noviembre y mayo (Pimentel *et al.*, 2017b).

Debido a la gran riqueza de ecosistemas y biodiversidad que podemos encontrar en Sierra Nevada, no propias de las latitudes a la que se encuentra (37° N), son varias las figuras de protección que repercuten en Sierra Nevada. Desde 1986, 172 238 ha de Sierra Nevada fueron

declaradas Reserva de la Biosfera, la máxima figura protección jurídico ambiental existente. En 1989, se declaró Parque Natural y en 1999 se protegió 86.208 ha con la máxima protección estatal existente declarándose Parque Nacional.

2.2. Escala Local: Acequia de Barjas

La Acequia de Barjas está situada en el término municipal de Cañar, municipio de poco más 350 habitantes al oeste de la Alpujarra granadina y a 32 km en línea recta de Granada.

Aproximadamente la mitad del municipio se encuentra dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada, y la totalidad dentro del Parque Natural. Cañar tiene 4 acequias registradas en el Inventario de Acequias de Sierra Nevada, 3 que parten del Río Chico, afluente del río Guadalfeo en su margen derecha, entre ellas la acequia. de Barjas, y una cuarta en la ladera izquierda de la cuenca del río Chico.

3.- Datos disponibles

Tres han sido las fuentes de datos utilizadas en este estudio.

3.1. Inventario de Acequias de Sierra Nevada

El Inventario de Acequias elaborado por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía en el año 2010 a partir del Proyecto de Actualización, digitalización y georreferenciación de la red de acequias de careo en el EENNPP de Sierra Nevada ha sido utilizado como punto de partida en el análisis a escala global de las acequias de Sierra Nevada.

Un proceso de filtrado de acequias fue necesario para reducir las más de 440 acequias y más de 750 km.

El criterio que se utiliza para el filtrado es el percentil 90 de la distribución de las longitudes (4760m), escogiendo aquellas por encima de este umbral lo cual permitió reducir el número de acequias a 45 (Fig. 2).

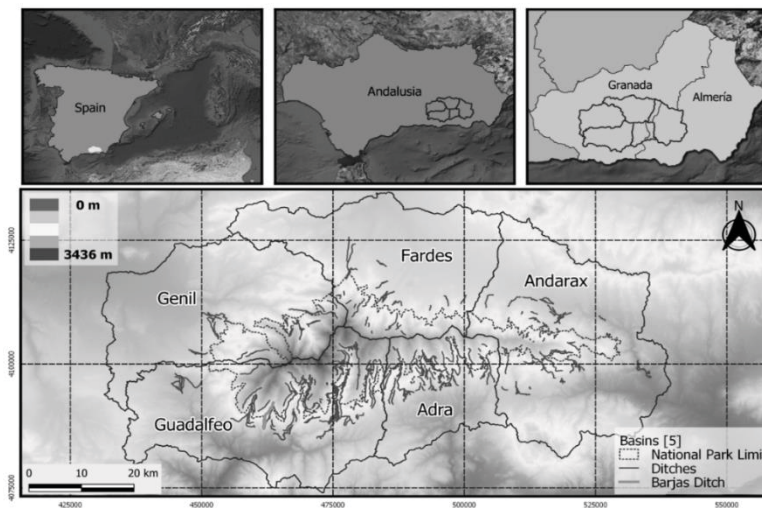


Fig. 1. Localización de Sierra Nevada junto con el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de Andalucía de 10m, las principales cuencas hidrográficas y las extensiones del Parque Nacional y de las acequias.

A 8 km del pueblo de Cañar, es una acequia principalmente de riego que redirige el flujo de agua que capta del río Chico a 1573 m.s.n.m. de altitud. Se trata de una acequia de poco más de 3 km, un coeficiente de sinuosidad de 1,12 (de los más bajos de Sierra Nevada) y una pendiente 0.0025 m/m.

La Acequia de Barjas que llevaba abandonada más de 20 años y fue elegida para su restauración como caso piloto por el proyecto MEMOLA. Estas labores de restauración se sucedieron entre febrero y marzo del 2014, mediante el uso y técnicas tradicionales y la ayuda de más de 180 voluntarios, alguno de los cuales sigue participando anualmente en labores de limpieza.

A día de hoy, el agua que fluye por la acequia alimenta a la comunidad de regantes, a las fuentes naturales del pueblo de Cañar, a la vegetación colindante destacando un fantástico robleal.

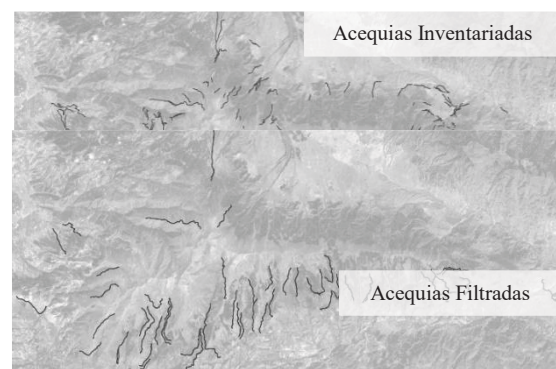


Fig. 2. Acequias inventariadas en Sierra Nevada por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (arriba). Acequias resultantes del proceso de filtración (abajo).

3.2. Información satelital

El conjunto de imágenes utilizado para este estudio pertenece a la colección del Proyecto ECOPOTENTIAL (<http://www.ecopotential-project.eu/>). Se trata de un proyecto europeo que trata de mejorar el estado de distintos ecosistemas europeos en el futuro a partir de las observaciones terrestres.

Esta colección está compuesta por información satelital proveniente de las misiones Landsat 5,7 y 8, que trabaja con las reflectancias en el óptico y operadas por la NASA. La colección está formada por 159 imágenes con 30 x 30 m de resolución espacial de NDVI ya calculado desde julio de 1984 a marzo de 2017 con una distribución temporal no homogénea debido a varios factores limitantes como la existencia de nubes o el fallo en la transmisión de la información.

3.3. Mapa de usos de suelo

Se ha utilizado el mapa de usos de suelo de Andalucía del año 2007 de Andalucía obtenido de la Red de Información Ambiental, REDIAM, para la obtención de los usos predominantes en el área colindante de las acequias. El mapa de usos de suelo tiene una resolución espacial de 250x250 m y contempla 161 usos distintos que finalmente, debido al elevado número de usos de suelo con características similares, se ha simplificado los usos a 8 clases generales: quercíneas, coníferas, uso agrícola, arbusto denso arbolado, arbusto disperso arbolado, matorral, pasto sin árboles, pasto sin árboles y resto.

4.- Metodología

4.1. Escala Global: Sierra Nevada

4.1.1. Evolución histórica de la vigorosidad de la vegetación en la zona de influencia de las acequias

La evolución histórica de la vigorosidad de la vegetación en el área de influencia de acequia se realiza a través del análisis del valor del índice NDVI. Para cada imagen se analizan las distribuciones estadísticas de todos los píxeles dentro de las áreas de influencia de las acequias seleccionadas, calculando los estadísticos: máximo, cuartil 3 (Q3), mediana o cuartil 2, cuartil 1 (Q1) y mínimo del conjunto total de píxeles que se encuentra en el área de influencia de las acequias. Por ejemplo, para una imagen determinada, se obtendría los 5 estadísticos comentados para aproximadamente 35.377 píxeles que corresponderían al total de píxeles que se encuentran dentro del total de áreas de influencias

4.1.2. Caracterización de la distribución histórica de la vigorosidad de la vegetación en cada acequia, según uso de suelo

Tras el análisis promediado de la evolución temporal de la vegetación en el área de influencia de todas las acequias,

se realiza un análisis individual de cada una de ellas. Para ello en cada acequia se calcula la distribución histórica de los valores de NDVI y se analizan las posibles relaciones entre dichos valores y algunos de los indicadores fisiográficos que pudieran condicionarlos.

4.1.3. Influencia de la proximidad de la acequia en la vigorosidad de la vegetación

Para analizar si realmente la proximidad de las acequias a la vegetación colindante tiene una influencia en la vigorosidad de ésta, se seleccionan dos nuevas áreas de influencia aledañas a la anterior, quedando definidas así las 3 áreas de influencia:

- AI - 1: área de influencia definida por los puntos que distan 50 m ambos lados del eje de la acequia (área inicial).
- AI - 2: área de influencia definida por los puntos que distan más de 50 m ambos lados del eje de la acequia, pero menos de 200 m a ambos lados de dicho eje.
- AI - 3: área de influencia definida por los puntos que distan más de 200 m ambos lados del eje de la acequia.

4.2. Escala Local: Acequia de Barjas

A esta escala se analiza la influencia de la restauración de la acequia en la vegetación colindante. En este caso utilizaremos la premisa de que el estado de la vegetación a final del año hidrológico puede tomarse como indicador indirecto del contenido de agua en el suelo (Gómez-Giráldez et al. 2014) y por lo tanto nos ofrece una aproximación de cómo han sido las condiciones hidrológicas a lo largo del año que termina.

4.2.1. Influencia de la restauración en la vigorosidad de la vegetación en el área de influencia de la acequia

En este primer análisis a escala local se analizan las distribuciones de los valores de NDVI de la imagen representativa del final del año hidrológico, antes y después de la restauración. Para asegurar que los cambios son debidos a la restauración y no a la variabilidad natural del clima, se realiza un análisis comparativo con la precipitación total de cada año, ya que se trata ésta de la variable climática más influyente en la vigorosidad de la vegetación.

4.2.2. Evolución de la vigorosidad de la vegetación a lo largo del perfil de la acequia

Por último, se analiza la evolución longitudinal de los valores del NDVI en el área de influencia (AI - 1) a lo largo del cauce con el objetivo de determinar si existen diferencias en la vegetación adyacente entre las partes altas, más cercanas a la derivación desde el río Chico y por tanto con mayor probabilidad de un número de días con agua circulante, y las partes más bajas, más alejadas de las zonas de aporte, y con una probabilidad menor de días con

agua circulando. Para ello se ha dividido el área de influencia en 4 zonas (B1, B2, B3 y B4) en dirección aguas abajo y de igual superficie (Fig. 3). En cada zona se han analizado las distribuciones del valor del NDVI en las imágenes seleccionadas antes y después de la restauración.

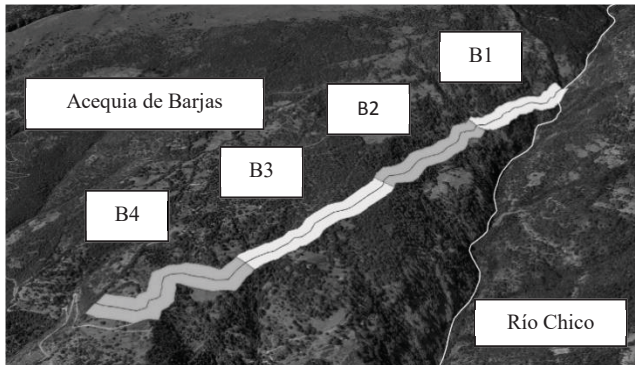


Fig. 3. Representación del río Chico, de la acequia de Barjas y la zonificación realizada a partir del área de influencia.

5.- Resultados y discusión

5.1. Escala Global: Sierra Nevada

5.1.1. Evolución histórica de la vigorosidad de la vegetación en la zona de influencia de las acequias

Con el objetivo de observar la evolución en el tiempo de la vigorosidad de la vegetación a partir del NDVI, se muestra en la fig. 4 la representación de los estadísticos (máximo, Q3, mediana, Q1 y mínimo) para el total de las 159 imágenes. Puede observarse una gran variabilidad en la evolución de los valores de los estadísticos seleccionados para representar la distribución del NDVI a lo largo de todo el periodo.

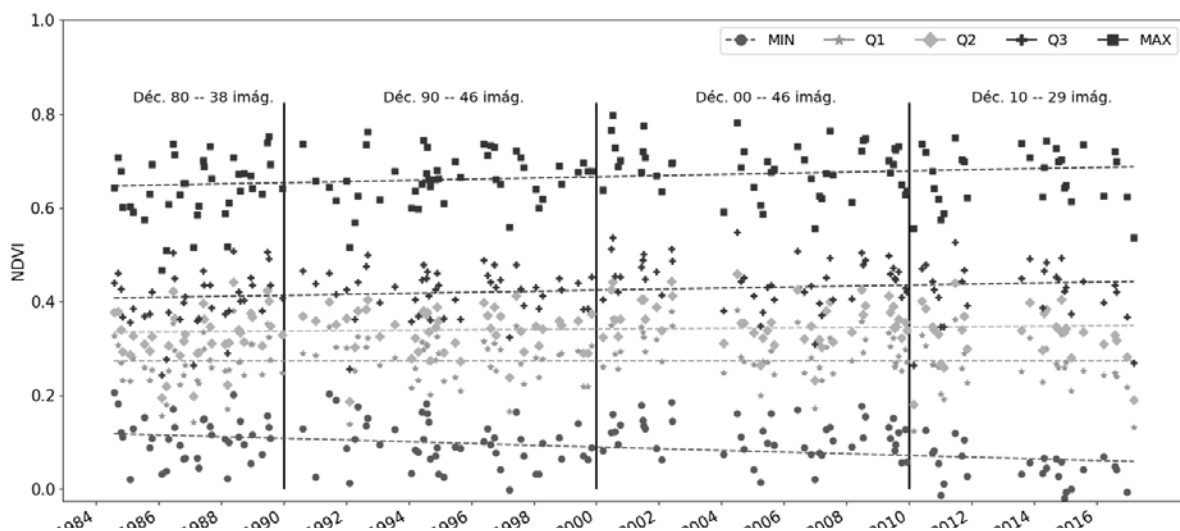


Fig. 4. Representación del máximo, cuartil 3, cuartil 2 o mediana, cuartil 1 y mínimo para el total de píxeles que se encuentran dentro del área de influencia de todas las acequias analizadas (aprox. 3184 ha).

Sin embargo, la no homogeneidad entre las fechas disponibles para el análisis hace a las variaciones estacionales de la vegetación parcialmente responsables de este hecho. Al analizar la evolución de los estadísticos manera promediada, los resultados muestran una evolución ascendente del valor máximo de NDVI en la zona de influencia de las acequias, con valores que oscilan entre 0.641 en la primera década analizada y los 0.668 en la última. Por el contrario, puede observarse una evolución descendente de los valores mínimos del NDVI, con valores que oscilan entre los 0.101 y 0.035, para la primera y última década respectivamente.

5.1.2. Caracterización de la distribución histórica de la vigorosidad de la vegetación en cada acequia, según uso de suelo

En la Fig. 5, las acequias que muestran los valores de NDVI más bajo son aquellas que tienen el matorral como uso de suelo predominante por ser este tipo de cubierta vegetal la que menor vigorosidad puede alcanzar (Baghzouz et al., 2010, Huemrich & Goward, 1997). Por otro lado, son las acequias con un uso de suelo predominantemente de quercíneas, alguna de ellas de comportamiento caduco, las que se obtienen los valores de NDVI más alto por encima incluso de aquellas dedicadas al uso agrícola. En la Tabla 1 podemos observar los valores de los estadísticos media y mediana del NDVI que hemos comentado anteriormente.

Tabla 1. Mediana y Media de los valores de NDVI para cada acequia en toda la colección de imágenes categorizado por uso de suelo.

Estadístico	Usos de suelo				
	Agricultura	Coníferas	Mixto	Quercíneas	Matorral
Media	0.413	0.392	0.383	0.424	0.289
Mediana	0.416	0.409	0.389	0.434	0.297

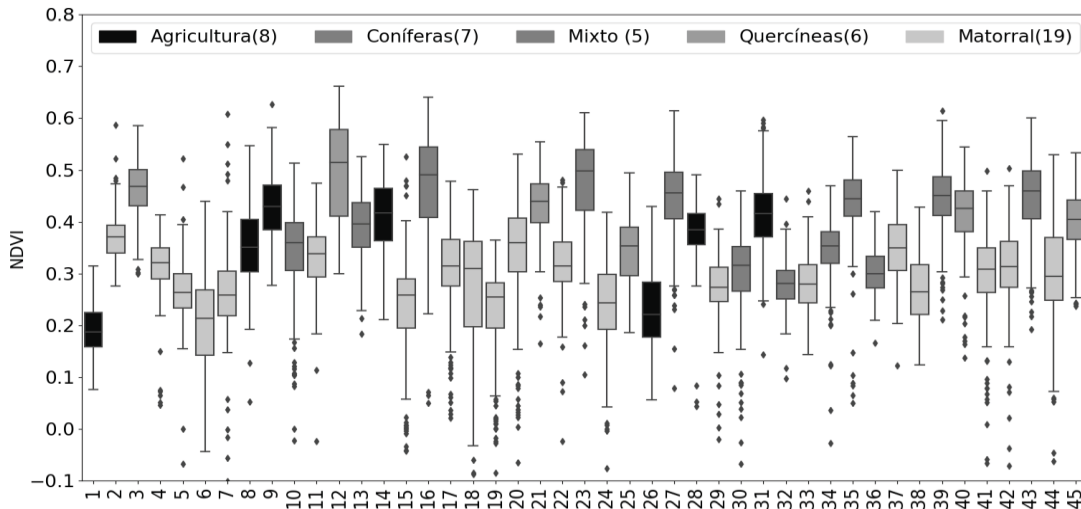


Fig. 5. Boxplots con las medianas de las 159 imágenes de las 45 acequias categorizado por el uso de suelo mayoritario en el área de influencia. La caja muestra el 50% de los datos (rango intercuartílico, RIC), la línea sólida representa la mediana, los bigotes muestra valores máximos y mínimo de la serie hasta el 1,5 de RIC y los puntos fuera de los bigotes se consideran puntos atípicos o extremos.

5.1.3. Influencia de la proximidad de la acequia en la vigorosidad de la vegetación

En la Fig. 6 es palpable la influencia que las acequias ejercen en la vigorosidad de la vegetación adyacente. Se observa como los valores de NDVI, son muchos mayores en las zonas de influencia AI-1 y AI-2 que en la zona AI-3. Puede observarse además la influencia de los ciclos estacionales anteriormente descrita, siendo claro el impacto de la presencia de nieve durante los meses invierno y como a medida que se va fundiendo la nieve aumenta la diferencia entre los diagramas de cajas de las distintas áreas.

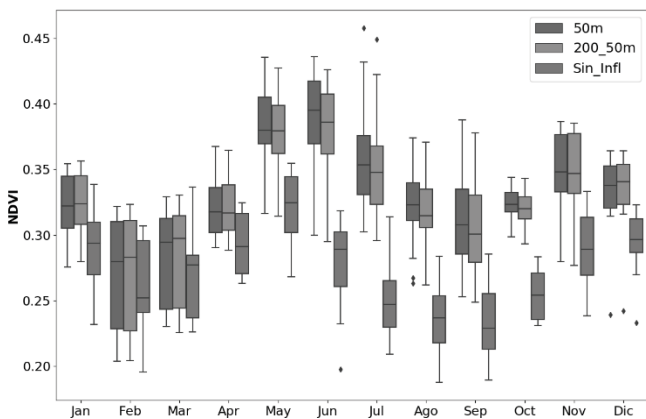


Fig. 6. Boxplots a escala mensual de los datos de NDVI categorizado por zona de influencia y cuenca hidrográfica. La caja muestra el 50% de los datos (rango intercuartílico, RIC), la línea sólida representa la mediana, los bigotes muestra valores máximos y mínimo de la serie hasta el 1,5 de RIC y los puntos fuera de los bigotes se consideran puntos atípicos o extremos.

5.2. Escala local: Acequia de Barjas

5.2.1. Influencia de la restauración en la vigorosidad de la vegetación en el área de influencia de la acequia

En los años posteriores a la restauración, los estadísticos obtenidos alcanzan valores de NDVI mayores que los medios en el periodo anterior, 0.445 en los tres posteriores a la restauración frente a 0.388 de los años anteriores. Sin embargo, la precipitación durante estos mismos años se corresponde con un valor muy cercano al medio, pudiendo por tanto descartar la correlación entre NDVI y precipitación y explicar este incremento gracias a la restauración de la acequia. Comparando los años post-restauración, con años anteriores de similar precipitación como puede ser el trienio formado por los años 2006, 2007 y 2008, se observa claramente que con una precipitación similar la respuesta del NDVI es superior en la última etapa (Fig. 7).

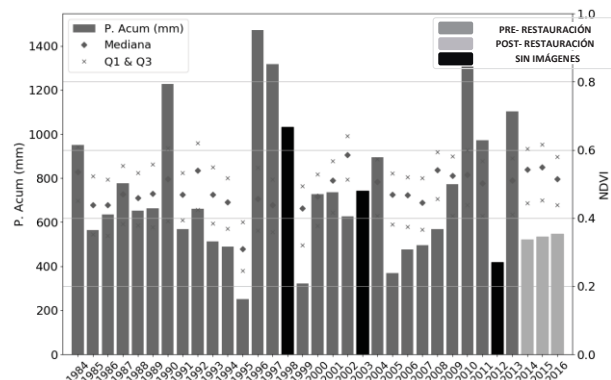


Fig. 7. Precipitación acumulada en mm y los estadísticos centrales de la distribución de los valores de NDVI para la imagen más cercana a final del año hidrológico (31 de agosto). En color más oscuro están representados los años en los que no hay imagen o la diferencia de fechas es muy amplia. El color más claro corresponde a los años posteriores a la restauración.

Si correlacionamos ambas variables (Fig. 8) podemos observar cómo los tres años posteriores a la restauración son aquellos que presentan valores más altos de NDVI al final del año para una precipitación anual baja. La Fig. 8 parece indicar también que existe un máximo valor de NDVI medio alcanzable en la zona de influencia al final del verano independiente al valor de la precipitación.

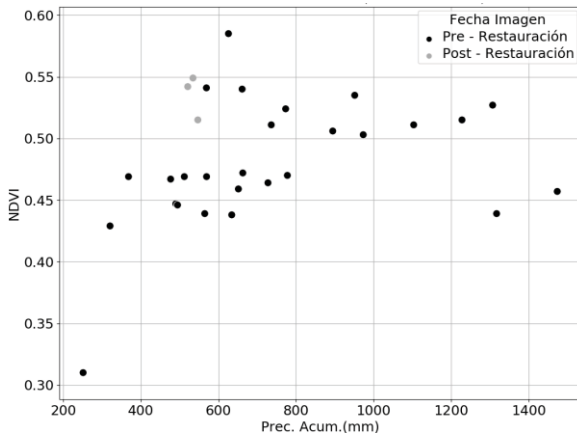


Fig. 8. Gráfico de dispersión entre la precipitación acumulada (mm) y la mediana del dataset de valores para la imagen más cercana al final del año hidrológico (31 de agosto) y diferenciando por colores los años anteriores y posteriores a la restauración.

5.2.2. Evolución longitudinal de la humedad del suelo

De nuevo se prueba con este estudio el efecto positivo de la restauración del cauce de la acequia. En las 4 zonas de la división se aprecia el aumento de los estadísticos del NDVI tras la restauración, a pesar de que la precipitación media de los años anteriores a la restauración es de 750 mm frente a los 530 mm de los 3 años posteriores (Fig. 9). Los incrementos porcentuales del valor de la mediana en las 4 zonas de la división son de 9,93 %, 5,74%, 10,78% y 13,40% respectivamente. Lo que pone de manifiesto un mayor aumento en la zona más baja y, por lo tanto, más alejada de la derivación, zona en la que tras la restauración se ha visto más favorecida probablemente por un mayor número de días con caudal circulante tras la restauración.

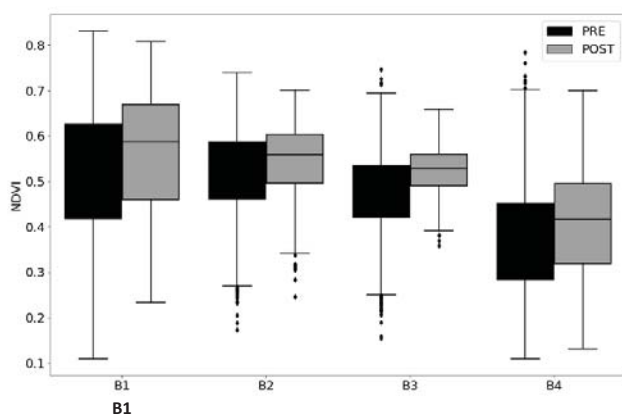


Fig. 9. Boxplots de los valores de NDVI para las 4 zonas originadas en la división del área de la acequia de Barjas y para la última imagen del año hidrológico y distinguiendo entre años previos y posteriores a la restauración.

6.- Conclusiones

El presente trabajo ha analizado la importancia eco-hidrológica de la red de acequias en Sierra Nevada, analizando para ello las 45 acequias de mayor longitud de las más de 442 acequias inventariadas que componen la red. Se utilizaron un total de 159 imágenes Landsat en el periodo 1984-2017 en las que se analizó la vigorosidad de la vegetación, a través del índice NDVI, en el área adyacente a las acequias.

La evolución en el periodo de estudio del índice de vigorosidad mostró una mayor amplitud en los valores máximos y mínimos a lo largo de los años, con valores relativamente estables en los valores medios y medianos. La amplia diferencia de días entre imágenes, en algunos casos de más de un año (los años 2003 y 2012 no tienen imagen) limitan la posibilidad de realizar análisis estadísticos tradicionales sobre esta evolución para determinar si estos patrones son realmente tendencias temporales.

A la vista de los resultados en las comparaciones del NDVI según áreas de influencias, se comprueba que existe un área de influencia en las proximidades de las acequias en la que la vigorosidad de la vegetación es más alta. La distancia entre el eje de las acequias y esa área de influencia parece diferir entre regiones. Mientras que en las acequias en la región de Guadalfeo esa distancia parece extenderse hasta los 50 m, en las acequias de Adra, dicha distancia es mayor, aumentando los valores de NDVI en el área definida entre 50 y 200 m desde el eje de la acequia. Esta diferencia podría estar marcada por el tipo de vegetación predominante en las acequias de cada región, matorral y quercíneas para Guadalfeo y Adra, respectivamente.

En cuanto a la acequia de Barjas queda demostrado el efecto positivo de la restauración de la acequia en 2014, con un aumento en los valores de NDVI en la zona colindante. Se ha demostrado que dicho impacto es debido a la restauración y no a patrones climáticos. Los tres años posteriores a la restauración, en los que la precipitación acumulada se situó incluso por debajo de la media anual, mostraron valores de NDVI que alcanzaron registros similares a los de años anteriores con el doble de precipitación acumulada. Habría sido interesante el análisis de un año con valores altos de precipitación para observar si realmente existe un aumento significativo del NDVI en este tipo de años o bien si existe un umbral máximo de NDVI en el ecosistema. Sin embargo, ninguno de los años posteriores ha arrojado tales valores. Hay que destacar también la heterogeneidad en las fechas de las imágenes seleccionadas como últimas del año hidrológico. Este obstáculo se podría solucionarse ampliando los huecos temporales de la colección de imágenes con información proveniente de otros sensores de mayor resolución espacial como es el de las misiones Sentinel. Por último, destacar que el impacto de la restauración queda reflejado a lo largo del eje longitudinal de la acequia, con aumentos en la vigorosidad a lo largo de todo el recorrido, pero con especial relevancia en los tramos más bajos, más alejados

de los puntos de derivación y con menor presencia de caudal circulante antes de la derivación

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado por el Programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en el marco del acuerdo de subvención N° 641762 con nombre “Ecopotential-Improving Future Ecosystem Benefits Through Earth Observations” H2020-SC5-16-2014-641762. Además del Proyecto OPERA (Operability in hydrological management under snow torrentiality/drought conditions in high mountain in semiarid watersheds) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidades, MICINN [Research Project RTI2018-099043-B-I00]. J. Aparicio agradece la financiación al Programa de Ayudas para contratos predoctorales para la formación de doctores del Ministerio de Ciencia e Innovación (PRE2019-090493). R. Pimentel agradece la financiación del Programa Juan de la Cierva-Incorporación del Ministerio de Ciencia e Innovación (IJC 2018-038093-I). P. Torralbo agradece la financiación al Programa de Doctorado del Ministerio de Educación y Formación Profesional (MEC-FPU 2018). J. Aparicio, R. Pimentel, P. Torralbo y M.J. Polo son miembros del DAUCO, unidad de Excelencia con referencias CEX 2019-000968-M, con financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal de Investigación, a través del Programa Severo Ochoa y María de Maeztu para Centros y Unidades de Excelencia en I+D.

7.- Bibliografía

- Baghzouz, M., D.A. Devitt, L.F. Fenstermaker y M.H. Young, 2010. Monitoring Vegetation Phenological Cycles in Two Different Semi-Arid Environmental Settings Using a Ground-Based NDVI System: A Potential Approach to Improve Satellite Data Interpretation. *Remote Sens.* 2, 990-1013.
- Beckers, B., J. Berking, y B. Schütt, 2013. Ancient water harvesting methods in the drylands of the Mediterranean and Western Asia. *Journal for Ancient Studies*, 2, 145-146
- Cano-Manuel, J., y E. Ortiz, 2010. El inventario de las Acequia de Sierra Nevada. *El Agua Domesticada: los paisajes de los regadíos de montaña en Andalucía*, 520-525.
- Courault, D., B. Seguin, y A. Olioso, 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modeling approaches. *Irrigat Drain Syst.* 19, 223-249
- Crook, D., y A. Jones, 1999. Design Principles from Traditional Mountain Irrigation Systems (Bisses) in the Valais, Switzerland. *Mt Res Dev*, 19(2), 79-99.
- Delaigue, M.C., 1995. La red de acequias de la Alpujarra Alta. *El agua en la agricultura de Al-Andalus*. 143-150.
- Glenn, E., A. Huete, P. Nagler y S. Nelson, 2008. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8(4), 2136-2160
- Gómez-Giráldez, Pedro J., C. Aguilar y M.J. Polo, 2014. Natural vegetation covers as indicators of the soil water content in a semiarid mountainous watershed. *Ecol. Indic.* 46, 524 - 535.
- González-Dugo, M.P., S. Escuin, F. Cano, V. Cifuentes, F.L.M. Padilla, J.L. Tirado, N. Oyonarte, P. Fernández y L. Mateos, 2013. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. II. Application on basin scale. *Agric. Water Manage.*, 125, 92 – 104
- Huemmerich, K.F. y S.N.Goward, 1994. Vegetation canopy PAR absorbance and NDVI: an assessment for ten tree species with the SAIL model. *Remote Sens. Environ.*, 61, 254-269
- Martín Civantos, J.M., 2006. Las aguas de Jérez del Marquesado (Granada). *I Congreso andaluz de Desarrollo Sostenible-V Congreso Andaluz de Ciencias Ambientales*. Granada, 221-226
- Molle, F. y C. Sanchis-Ibor, 2019. Irrigation Policies in the Mediterranean: Trends and Challenges. *Global Issues in Water Policy*, 279-313.
- Pérez-Palazón, M.J., R. Pimentel, J. Herrero, C. Aguilar, J.M. Perales y M.J. Polo, 2015. Extreme values of snow-related variables in Mediterranean regions: trends and long-term forecasting in Sierra Nevada (Spain). *Hydrol. Sci.*, 369, 157-162.
- Pérez-Palazón, M.J., 2019. Análisis de tendencias en los flujos de agua y energía de la capa de nieve a diversas escalas en Sierra Nevada. <https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/19159>
- Pimentel, R., J.Herrero, J. y M.J. Polo, 2017. Subgrid parameterization of snow distribution at a Mediterranean site using terrestrial photography, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(2), 805-820,
- Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 8 (2), 127-150
- Zvi Y. D. Ron, 1985. Development and Management of Irrigation Systems in Mountain Regions of the Holy Land. *Trans. Inst. Br. Geogr.* 10(2), 149-169.