

Cuantificación a partir de imágenes de satélite de la demanda hídrica agraria en el acuífero de Villacurí (Perú)

Salomón Montesinos-Melendo, Lara Fernández-Fornos, Salomón Montesinos-Aranda

Geodim, Torre Albarrana, 50340 Maluenda, Zaragoza, España.

s2montesinos@geodim.es, lfernandez@geodim.es, smontesinos@geodim.es

Resumen: El acuífero de Villacurí es un acuífero sobreexplotado. En el año 2009, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) de Perú, estableció declaratorias de “veda” o moratoria para el otorgamiento de nuevos usos de aguas subterráneas. Estas vedas tenían como objetivo limitar las extracciones de agua subterráneas y ayudar a la recuperación del acuífero. Nuestro estudio demuestra que, desde 2009 y en el plazo de 10 años, la superficie en regadío se ha incrementado un 26% pasando de las 10 679 ha a las 13 448 ha. Si utilizamos las dotaciones hídricas medias que se derivan de los estudios del ANA, en lugar de unas extracciones de 228 hm³/año en el año 2009, uno de nuestros escenarios estima unas extracciones de unos 190 hm³/año, pero con esas mismas dotaciones, el incremento de la superficie en regadío en 2019, nos lleva hasta los 240 hm³/año, lejos del objetivo de las vedas. El futuro del acuífero de Villacurí pasa por un control más efectivo de las superficies realmente regadas que impida el aumento del regadío y por un uso más efectivo del agua destinada a riego.

Palabras clave: Landsat, NDVI, acuífero, sobreexplotado, vedas, Villacurí.

Quantification of agricultural water demand in the Villacurí aquifer (Peru)

Abstract: The Villacurí aquifer is an overexploited aquifer. According to the National Water Association (ANA), for renewable resources of about 63 hm³/year, the extractions are 228 hm³/year. In 2009, through respective resolutions, it established declarations of closure for the granting of new uses of groundwater. These closures were intended to limit groundwater withdrawals and help the aquifer to recover. Our study shows that, since 2009 and within 10 years, the irrigated area has increased by 26%, from 10679 ha to 13448 ha. If we use the average water endowments derived from the ANA studies, instead of withdrawals of 228 hm³/year in 2009, our scenario (1) estimates withdrawals of about 190 hm³/year, but with the same endowments, the increase of the irrigated area in 2019, brings us up to 240 hm³/year, far from the objective of closures. The future of the Villacurí aquifer involves a more effective control of the areas actually irrigated to prevent the increase in irrigation and a more effective use of water intended for irrigation.

Keywords: Landsat, NDVI, aquifer, overexploited, Villacurí.

1. INTRODUCCIÓN

El acuífero de Villacurí se encuentra situado en el departamento de Ica, en el SW de la República del Perú. El acuífero se localiza en la cuenca hidrográfica del río Seco, que es una intracuenca situada entre las de los ríos Pisco, al norte e Ica, al Sur (Figura 1).



Figura 1. Localización el acuífero de Villacurí (Perú).

Morfológicamente, la zona presenta dos relieves diferenciados. Uno, constituido por los macizos rocosos ígneos de los Andes y de la cordillera costera, con relieves abruptos y empinados que encierran a otra, de relieves suaves y con forma de depresión. La cordillera antigua de la costa, constituida por granito rojo, forma el cinturón SW que rodea la depresión y constituye una barrera impermeable tanto para las aguas superficiales, impidiendo su marcha hacia el mar, como para las aguas subterráneas (Vara, 2000).

En el año 2008, Perú creó la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y al año siguiente promulgó la Nueva Ley de Recursos Hídricos, n°29338. Ambas actuaciones concebidas bajo una serie de principios entre los que destacan la Gestión Integral de Recursos Hídricos y el aseguramiento de los derechos de agua de los usuarios (Guevara et al., 2018).

En el año 2009, ANA estableció que la explotación del acuífero de Villacurí (228 hm³/año) superaba el volumen

de reservas explotables (63 hm³/año), lo que suponía una sobreexplotación de 165 hm³/año (262%).

Ese mismo año (ANA, 2009a,b), a través de las resoluciones 0327-2009-ANA y 0763-2009-ANA, se declaró una veda que limitaba el otorgamiento de nuevos usos de aguas subterráneas en los acuíferos del valle del río Ica y Villacurí y, en el acuífero de Pampa de Lanchas.

En el año 2011 (ANA, 2011), las vedas fueron ratificadas mediante resolución jefatural 0330-2011-ANA, manteniendo la prohibición de perforación de pozos o de ejecución de cualquier tipo de obra destinada a la extracción de recursos hídricos subterráneos o al incremento de los volúmenes de extracción. También quedó prohibido el otorgamiento de autorizaciones de ejecución de obras o derechos de agua subterránea, aunque se tratase de solicitudes en vía de regularización.

El objetivo principal de este trabajo se centra en la mejora del conocimiento hídrico del acuífero de Villacurí (Perú) a partir del análisis de los datos recopilados desde diferentes fuentes, especialmente desde teledetección espacial, y su integración en el marco de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Este objetivo principal, lo hemos desglosado en 3 objetivos parciales:

1. Recopilación de imágenes de satélite desde el año 1985 hasta la actualidad, para conocer la evolución del acuífero de Villacurí en los últimos 35 años.
2. Análisis de la superficie en regadío existente desde el 2009, año en el que se declaró una veda sobre los recursos subterráneos de los acuíferos de Ica, Villacurí y Lanchas (ANA, 2009a,b).
3. Una estimación de la demanda hídrica agraria en el acuífero de Villacurí, mediante la cuantificación de las superficies en regadío y la generación de escenarios de riego.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Nuestro primer objetivo ha sido conocer la evolución del acuífero de Villacurí en los últimos 35 años (desde 1984, año en que se lanzó el satélite Landsat 4 con 30 metros de resolución espacial), ya que la imagen Landsat más antigua de la zona, del año 1974, del sensor MSS a bordo de Landsat 1, nos ha permitido comprobar que entre 1974 y 1984 la superficie en regadío en el acuífero era muy similar y que es a partir de finales de los años 80, cuando comienza la expansión del regadío en la zona.

Para ver esta evolución, hemos generado un *time-lapse* a partir de composiciones RGB en color infrarrojo (NIR-SWIR-R) que nos permiten discriminar la superficie en regadío existente en el momento de la toma de la imagen de satélite.

El seguimiento de la evolución de la superficie en regadío desde 1984 (270 fechas de imágenes de la serie Landsat) nos ha permitido conocer, cualitativamente, que estamos ante un fenómeno dinámico (cultivos que aparecen y desaparecen a lo largo del tiempo) que no se detiene con la declaración de veda del año 2009 (ANA, 2009a,b).

El objetivo principal de nuestro estudio es realizar un análisis cuantitativo de la evolución de la superficie en regadío y de la demanda hídrica agraria entre los años

2009 y 2019 para conocer la superficie realmente regada y su distribución en el acuífero.

Tabla 1. Fechas (año-mes-día) de las imágenes Landsat disponibles, libres de nubes, a partir de las cuales se ha calculado la superficie en regadío existente cada año en el acuífero de Villacurí.

2009	2011	2015	2018	2019
2009-0105	20110103	20150106	20180114	20190101
20090121	20110511	20150311	20180303	20190117
20090206	20110815	20150327	20180506	20190202
20090310	20110831	20150412	20180522	20190322
20090411	20110924	20150428	20180709	20190407
20090427	20111103	20150701	20180927	20190423
20090513	20111119	20150717	20181029	20190610
20090817	20111205	20150818		20190712
20090902		20150903		20190728
20091004		20150919		20191016
20091020				20191101
20091105				20191117
20091207				

La información contenida en las imágenes de satélite de la serie Landsat (Tabla 1) la hemos extraído utilizando índices de vegetación (Montesinos, 1990). Estos índices permiten obtener la vegetación activa minimizando la respuesta espectral debida al suelo y a las condiciones atmosféricas (Gilabert et al., 1997).

Para extraer el área regada en cada fecha, hemos utilizado el tradicional Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a partir de las imágenes de la serie Landsat de Nivel 1 suministradas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

A partir del NDVI hemos establecido un nivel de corte que diferencia la vegetación activa del suelo. Este valor de corte se establece para cada una de las fechas disponibles ya que el contraste suelo-vegetación varía dependiendo del estado de desarrollo fenológico de los cultivos. Por último, mediante un operador lógico hemos generado un archivo bit en el que 1 es "regadío" y 0 es "suelo". Este archivo representa el área regada en el momento de la toma de la imagen por el satélite. Para obtener la superficie en regadío a lo largo del año, lo que hemos hecho ha sido unir todas las superficies regadas en cada una de las fechas, mediante un operador lógico (OR). Este operador realiza una suma lógica de los archivos bit con el área regada en cada fecha.

El resultado es un nuevo mapa bit en el que 1 es cualquier píxel que ha estado regado en alguna de las fechas analizadas y 0 es cualquier píxel que siempre ha sido "suelo".

Conocido el número y el tamaño de los píxeles en la zona de estudio, que el caso de Landsat es de 30×30 metros (equivalente a 900 m² o 0,09 ha), multiplicando ambos obtenemos la superficie en regadío. Sin embargo, la resolución espacial de Landsat solo nos permite trabajar a escalas entre 1:50 000 y 1:150 000, lo que puede llegar a producir un sesgo en la cuantificación ya que muchos píxeles van a estar a caballo entre parcelas.

A este efecto se le denomina “*píxeles de borde*” y en la cuantificación nos va a producir errores de omisión (píxeles que siendo “*regadío*” no se han clasificado como “*regadío*”) y errores de comisión (píxeles clasificados como “*regadío*” que no son “*regadío*”). Para eliminar esta incertidumbre, vamos a utilizar *Tiles Maps* de muy alta resolución para definir “*recintos de riego*” a escala 1:5000.

A partir de la información temática de superficies en regadío obtenida de las imágenes Landsat y utilizando como base cartográfica los WMTS de *Google Earth* y *Bing Aerial* hemos digitalizado todos los “*recintos de riego*” existentes en la zona de estudio. Se han digitalizado 5739 “*recintos de riego*” que corresponden a aquellas parcelas o parte de parcelas que han estado en algún momento en riego en el periodo 2009-2019 (Figura 2).

Para cuantificar la superficie en regadío existente en cada año de estudio, hemos cruzado la información ráster de los mapas bit obtenidos de las imágenes de satélite, con la información vectorial de los “*recintos de riego*”. Esto se hace mediante una función estadística de “*mayoría*”. Esta función establece que el “*recinto de riego*” se considerará en “*regadío*” si la mayoría de los píxeles contenidos están en regadío y se considerará “*no riego*”, cuando la mayoría de los píxeles no sean regadío (Figura 2).



Figura 2. Recintos de riego digitalizados y distribución de la superficie en regadío en 2009 en el acuífero de Villacurí.

3. RESULTADOS

3.1. Evolución del acuífero de Villacurí (1984-2020)

La evolución del acuífero de Villacurí, en los últimos 35 años, se puede ver en <https://vimeo.com/423493753>.

Las composiciones en color infrarrojo de las imágenes Landsat nos permiten ver (en rojo) la evolución de las superficies en regadío y la dinámica de desarrollo vegetativo existente en el acuífero.

3.2. Estimación de la superficie en regadío (2009-2019)

A partir de la información que nos aportan las imágenes de satélite hemos estimado la superficie en regadío existente en el acuífero de Villacurí en el periodo 2009-2019 (Figura 3).

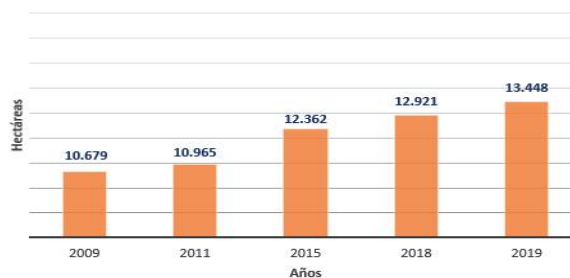


Figura 3. Estimación de la superficie en regadío en el acuífero de Villacurí (2009-2019).

La superficie en regadío existente en el año 2009 era de 10 679 ha que, en 2011, momento en que se ratifica la veda, es de 10 965 ha. Sin embargo, 4 años más tarde, en 2015, la superficie en regadío se había incrementado un 16%, hasta las 12 362 ha y en 2019, un 26%, hasta las 13 448 ha.

Una ventaja de estimar la superficie en regadío mediante teledetección en lugar de con técnicas estadísticas tradicionales, es que tenemos una “*fotografía*” de la localización de los “*recintos de riego*” considerados como regadío (Figura 2).

3.3. Escenarios de demanda hídrica agraria

La estimación de la demanda hídrica agraria es uno de los aspectos más difíciles de estimar en la Planificación hidrológica. Sin embargo, calculada la superficie en regadío, basta con aplicar una dotación ($m^3/ha/año$) para conocer la demanda hídrica agraria. Esta sencilla operación se complica cuando tenemos que asignar una dotación media o por cultivo. Por ello, en nuestro estudio hemos optado por definir 4 escenarios de consumo para estimar la demanda hídrica de la zona, donde el cultivo principal es uva de mesa (Figura 4).

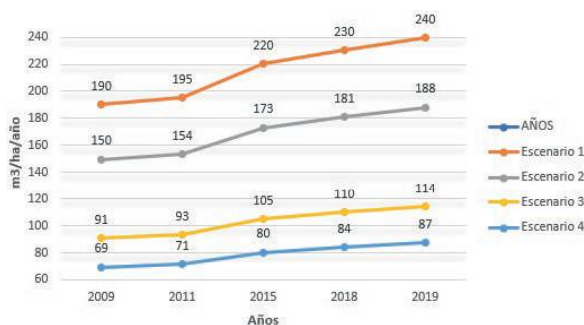


Figura 4. Evolución de la demanda hídrica en hm^3 .

El escenario 1 corresponde al cálculo realizado a partir de la dotación manejada por el ANA en sus cálculos de sobreexplotación, con un valor de $17 812 m^3/ha/año$.

El escenario 2, corresponde al cálculo realizado a partir de la dotación obtenida de una encuesta de campo realizada en la zona. Con un valor de $14 000 m^3/ha/año$.

El escenario 3, corresponde al cálculo realizado a partir de la dotación obtenida por Nima (2019), para el

cultivo mayoritario en la zona que es la uva de mesa, de 8500 m³/ha/año.

El escenario 4, corresponde al cálculo realizado a partir de la dotación obtenida por Allen (2017), para el cultivo mayoritario en la zona que es la uva de mesa, de 6500 m³/ha/año

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La estimación de la demanda hídrica agraria es uno de los aspectos más difíciles en la Planificación hidrológica. El uso de imágenes de satélite es una fuente de datos fiable que nos permite cuantificar la superficie en regadío existente en una zona.

En acuíferos como el de Villacurí, la demanda hídrica agraria coincide con las extracciones de agua subterránea que se están produciendo en el acuífero.

Una ventaja del uso de imágenes de satélite es que existen distintos tipos, con resoluciones espaciales y espectrales que podemos combinar. En nuestra metodología hemos utilizado imágenes Landsat para extraer la localización de las áreas regadas en cada fecha, para a partir de estas áreas regadas identificar la superficie en regadío existente en el acuífero en los años de referencia. Landsat es el satélite con la mejor resolución espacial (30 metros) y con el histórico más adecuado (imágenes desde 1974) para los objetivos que nos habíamos propuesto en el estudio. También, la teledetección nos permite acceder a ortoimágenes de resolución espacial submétrica. Esto es especialmente importante en países donde no cuentan con ortofotos y mucho menos actualizadas. Estas ortoimágenes nos permiten extraer mediante digitalización, los límites de parcelas o “recintos de riego” con precisión catastral.

La principal incertidumbre de nuestra metodología viene dada de las dotaciones empleadas por lo que hemos optado por definir escenarios de riego utilizando diferentes fuentes que nos permiten entender mejor los procesos y situación del acuífero.

Nuestro estudio demuestra que, desde 2009 y en el plazo de 10 años, la superficie en regadío se ha incrementado un 26% pasando de las 10679 ha a las 13448 ha. Si utilizamos las dotaciones hídricas medias que se derivan de los estudios del ANA, en lugar de unas extracciones de 228 hm³/año en el año 2009, nuestro escenario (1) estima unas extracciones de unos 190 hm³/año, pero con esas mismas dotaciones, el incremento de la superficie en regadío en 2019, nos lleva hasta los 240 hm³/año, lejos del objetivo de las vedas.

Otros escenarios de consumo que hemos obtenido, basados tanto en valores de encuestas de campo, como de dotaciones teóricas del cultivo predominante en la zona, nos hablan de consumos de agua subterránea, en 2019, entre 87 y 188 hm³/año. Si nos fijamos en el escenario más bajo, de 87 hm³/año, podemos intuir que una de las soluciones al problema de la sobreexplotación del acuífero de Villacurí pasa por un uso más efectivo del agua que se destina a la agricultura. En la actualidad, se hace un manejo como si se tratase de un recurso abundante sin riesgo de que pueda faltar. Sin embargo, ese riesgo existe debido a las características del acuífero con unas aportaciones mínimas por infiltración y seguramente, dependiente de

aportes subterráneos de otros acuíferos como el vecino acuífero de Ica.

Un riesgo que nuestro estudio pone en evidencia es que si bien, en 2019, la superficie en regadío existente era de 13448 ha, la superficie regable que hemos podido cuantificar, es decir, la superficie que ha estado en regadío en algún momento entre los años 2009 y 2019, es de 18969 ha. Esto significa 5000 ha que en el año 2019 no estaban en regadío, pero que tienen, en principio, infraestructura para ser regadas.

El futuro del acuífero de Villacurí pasa por un control más efectivo (mediante teledetección espacial) de las superficies realmente regadas que impida el aumento del regadío y por un uso más efectivo del agua destinada a riego, mediante la implantación de técnicas de agricultura de precisión que permitan determinar la cantidad de agua que realmente necesita el cultivo y evitar, lo que en la actualidad es un despilfarro del recurso.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación es un extracto del TFG de Salomón Montesinos Melendo para la obtención del grado de Geología en la Universidad de Zaragoza.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Allen Osorio, J.L. 2017. *Sistema de riego tecnificado en el cultivo de vid (Vitis vinifera L.)*. Tesis, Universidad de Lima. Lima. Perú.
- ANA. 2009a. *Resolución Jefatural 0327-2009-ANA*. Ediciones ANA.
- ANA. 2009b. *Resolución Jefatural 0763-2009-ANA*. Ediciones ANA.
- ANA. 2011. *Resolución Jefatural 0330-2011-ANA*. Ediciones ANA.
- Gilabert, M.A., González-Piqueras, J., García-Haro, J. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8, 1-10.
- Guevara, A., Nunovero, L. 2018. Del dicho al hecho hay mucho trecho: sobre la gestión integrada del agua en el Perú. *Revista Derecho & Sociedad*, 51.
- Montesinos, S. 1990. Teledetección: su utilización en la cuantificación y seguimiento de recursos hidráulicos aplicados al regadío. *Informaciones y Estudios*, 51. MOPU. Septiembre.
- Nima, S. 2019. *Determinación del consumo de agua de riego empleando el método del riego por goteo en el cultivo de vid. Variedades Crimson y Superior*. Tesis. Universidad Nacional de Piura. Facultad de Agronomía. Piura, Perú.
- Vara, C. 2000. *Estudios hidrogeológicos en Pampas de Villacurí*. ANA. Ica. Perú.