



**CENTRO DE
ECOLOGIA
APLICADA**



Evaluación de la condición temporal de las vegas y bofedales y análisis de la demanda hídrica

Términos de referencia de la investigación
asociada al cargo N° 10 Rol D-095-2017



Índice

1	Introducción	3
2	Objetivos	5
2.1	Objetivo General	5
2.2	Objetivos Específicos	5
3	Metodología	5
3.1	Análisis de la evolución temporal de la vegetación: contraste de tendencia, estabilidad de los sistemas y análisis de la formación vegetacional.....	5
3.1.1	Procesamiento y análisis de imagen multiespectral de alta resolución (WorldView)	5
3.1.2	Recopilación de información histórica de monitoreo –quebrada San Nicolás 7	
3.2	Determinación de la demanda hídrica de los sistemas.....	8
3.2.1	Representación del balance hídrico en sistemas de vegas y bofedales ...	8
3.2.2	Registro de escurrimientos superficiales (aforos)	9
3.2.3	Medición de evapotranspiración asociada a grupos vegetacionales	12
3.2.4	Medición de permeabilidad de suelos en sitios de vegas	23
4	Resultados	25
4.1	Análisis de la evolución temporal de la vegetación: contraste de tendencia, estabilidad de los sistemas, distribución espacial y análisis de la formación vegetacional.....	25
4.1.1	Contraste de tendencia y estabilidad de los sistemas	25
4.1.2	Distribución espacial	26
4.1.3	Análisis de la formación vegetacional	31
4.2	Determinación de la demanda hídrica de los sistemas.....	34
4.2.1	Mediciones de la demanda hídrica para la mantención del nivel de aguas subterráneas (flujo superficial)	34
4.2.2	Mediciones de la demanda hídrica para la mantención del nivel de aguas subterráneas (flujo subsuperficial).....	34
4.2.3	Mediciones de la demanda hídrica para la mantención de la vegetación (evapotranspiración)	35
4.2.4	Integración de las componentes de la demanda hídrica.....	36
5	Conclusión	38



1 Introducción

Los sistemas vegetacionales altoandinos que se desarrollan en el entorno de la faena de CMDIC corresponden a humedales azonales, dada su dependencia directa con las aguas subsuperficiales locales que permiten la mantención de estos sistemas. Estas aguas corresponden a aguas de afloramiento que aparecen a lo largo de los humedales, y que se desarrollan como parte del flujo subsuperficial de las quebradas o se expresan superficialmente como pequeños flujos que recorren partes del humedal. Desde ambas componentes, es extraída el agua que requiere la vegetación ahí presente para su desarrollo fisiológico.

La disponibilidad de las aguas subsuperficiales variarán en el tiempo, especialmente intra-anualmente, como respuesta a los ciclos estacionales de recarga hídrica general. Es por ello que la vegetación dará cuenta de estos ciclos, en términos de su productividad (actividad fotosintética - NDVI) y cobertura (extensión y alcance de la formación).

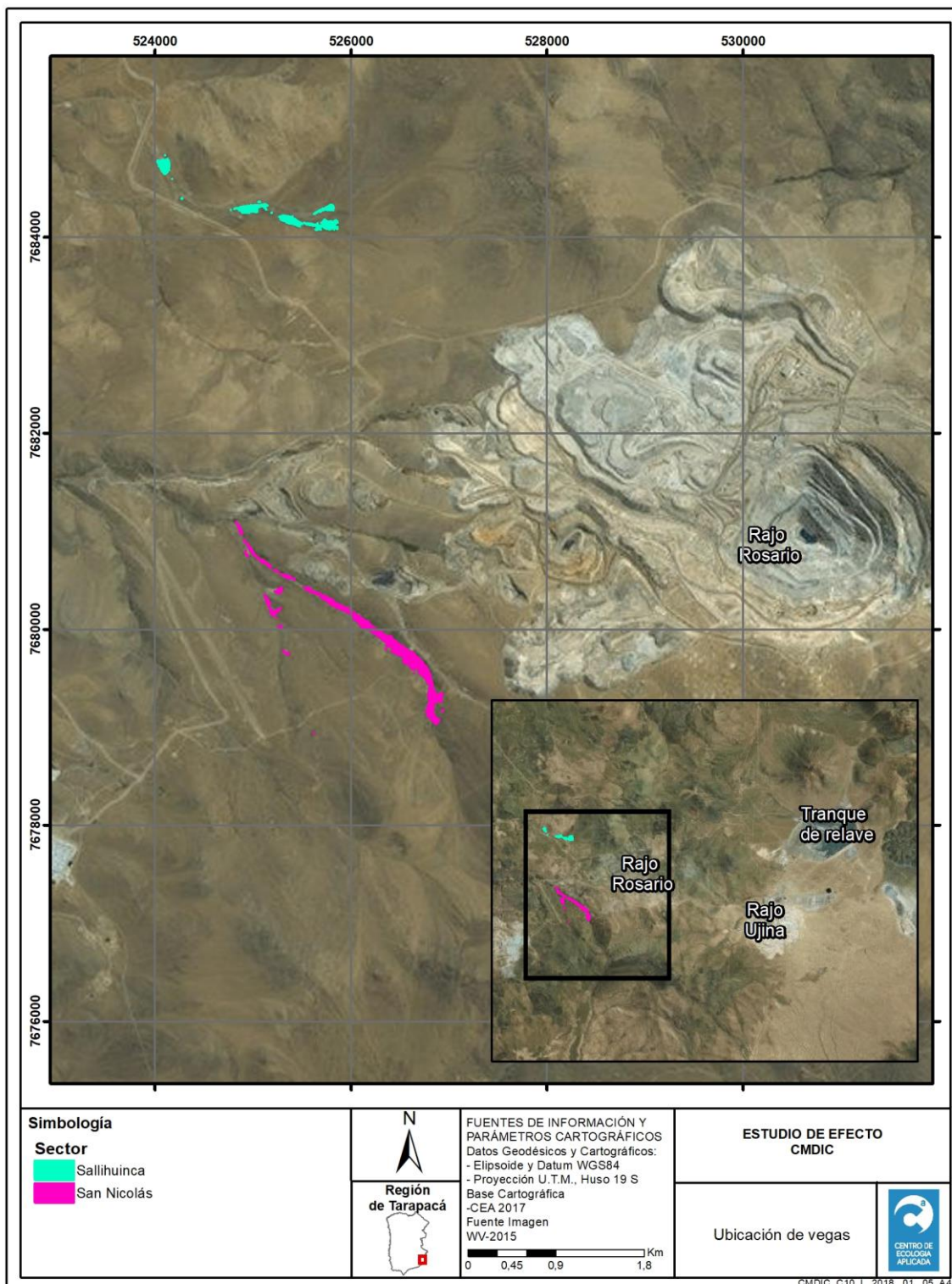
Los sistemas que se encuentran insertos en las inmediaciones de las faenas de CMDIC cuentan con condiciones y características similares entre sí, todos ellos de características azonales y con una dependencia estricta del agua del acuífero local. De todos ellos, la quebrada San Nicolás cuenta con una recarga artificial, implementada como parte del aseguramiento de las aguas en sectores ubicados aguas abajo de ella (QDH2). Esta medida no solo ha permitido cumplir con el requerimiento hídrico en las zonas aguas abajo, si no que con su paso a través de quebrada San Nicolás, ha producido una mejora considerable y permanente del humedal. Así, la recarga también ha representado una medida de mejora del humedal de San Nicolás.

De los sistemas ubicados en las cercanías de San Nicolás, el encontrado en quebrada Sallihuinca corresponde al sistema más cercano y que no presenta conexión de cuenca con San Nicolás. Es por ello que se selecciona la quebrada de Sallihuinca como sistema de contraste y comparación, y como sistema candidato para la aplicación de una medida de recarga local para el mejoramiento de su condición y productividad.

Como parte de los análisis se realiza el análisis de imágenes satelitales multiespectrales para determinar la evolución de los dos sistemas (San Nicolás y Sallihuinca), junto con la determinación de la demanda hídrica total de ellos. Ambos análisis permiten realizar un contraste entre los humedales, en donde San Nicolás cuenta y estará marcado por la presencia de la recarga de aguas en la cabecera; mientras que Sallihuinca no cuenta con aportes externos, presentando una condición y evolución natural.

La ubicación y extensión espacial aproximada de ambos sistemas se muestran en la Figura 1-1.

Figura 1-1 Ubicación de quebrada Sallihuınca y quebrada San Nicolás en las inmediaciones de CMDIC.





2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Realizar el análisis de la evolución temporal de 2 sistemas vegetacionales ubicados en el entorno de CMDIC, San Nicolás y Sallihuinca, realizando el contraste de la evolución de ambos en el tiempo como respuesta a la recarga hídrica artificial en el caso del sistema San Nicolás y a una condición natural del sistema Sallihuinca.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos se plantea:

- Analizar la evolución temporal de la vegetación presente en las quebradas San Nicolás y quebrada Sallihuinca, en términos de su productividad (NDVI), mediante el análisis de imágenes multi-espectrales de alta resolución.
- Analizar los monitoreos históricos de vegetación en San Nicolás para evidenciar si existe una influencia de la recarga sobre su composición (riqueza) y cobertura.
- Determinar la demanda hídrica de los sistemas en análisis para la posible aplicación de una nueva medida de mejora basada en la recarga hídrica de la quebrada u otra acción pertinente.

3 Metodología

A continuación se entrega cada una de las metodologías requeridas para el desarrollo de ellos de los objetivos antes indicados.

3.1 Análisis de la evolución temporal de la vegetación: contraste de tendencia, estabilidad de los sistemas y análisis de la formación vegetacional

El análisis temporal es realizado en base al procesamiento y análisis de imágenes multispectrales de alta resolución, correspondientes a imágenes adquiridas con el sensor satelital WorldView. Cada imagen cuenta con información en un mínimo de 4 bandas espectrales, las cuales permiten determinar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada – NDVI (de sus siglas en inglés), el cual permitirá realizar primeramente la delimitación de la superficie que cuenta con cobertura vegetacional, y segundo, segmentar esta área según producción fotosintética (productividad).

De forma complementaria, se recopilará la información histórica de monitoreo de vegetación en quebrada San Nicolás, con el fin de ver la existencia de cambios y patrones asociados a la existencia de la recarga artificial.

A continuación se entrega la metodología para el procesamiento de las imágenes.

3.1.1 Procesamiento y análisis de imagen multispectral de alta resolución (WorldView)

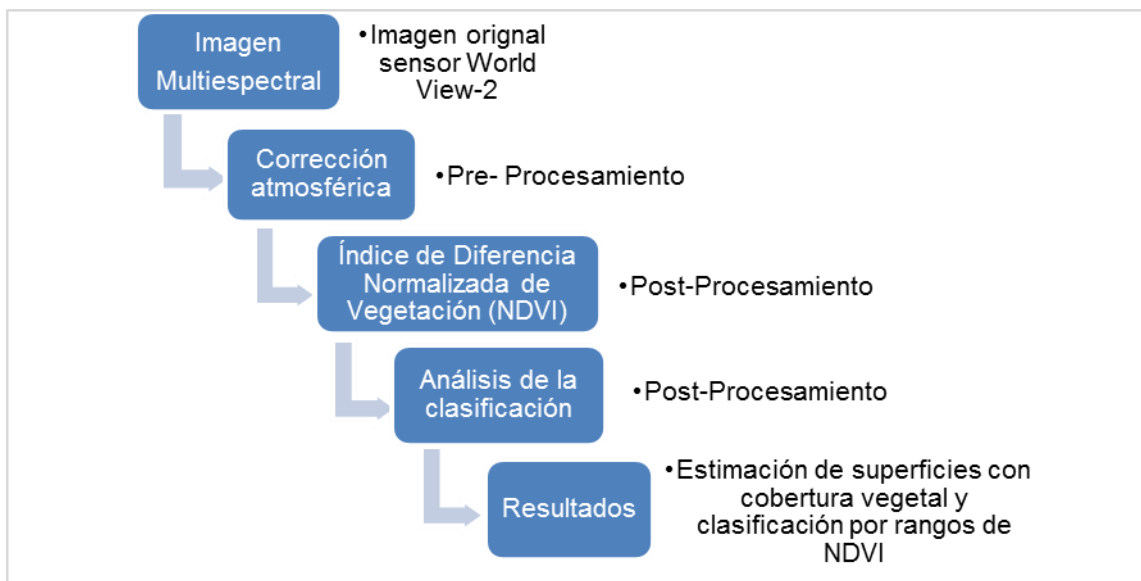
El uso de imágenes de archivo de sensores de alta resolución espacial se encuentra sujeto a las condiciones atmosféricas existentes en el momento de captura de la imagen, y de la resolución temporal de los satélites disponibles. Las características del sensor utilizado en el análisis se entregan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Características espaciales y espectrales de satélite WorldView.

Características	Satélite Worldview-2
	Tipo sincrónica con el sol
	Período: 100 minutos
	Pancromática: 450 – 800 nm
Bandas Sensor	Multiespectrales: Azul: 450 – 510 nm Verde: 510 – 580 nm Rojo: 630 - 690 nm Infrarrojo (Nir-1): 770 – 895 nm
Resolución del sensor	Pancromática: 0,46 m en el nadir; 0,52 m 20° fuera del nadir
	Multiespectral: 1.85 m en el nadir; 2,07 m 20° fuera del nadir

El procesamiento de las imágenes Multiespectral WorldView utilizadas, constó de dos fases principales de trabajo, correspondientes al Pre-procesamiento y Post-procesamiento, las que se indican en la Figura 3-1.

El pre-procesamiento está enfocado en la corrección atmosférica de la imagen a utilizar, con lo que es posible eliminar los efectos de la atmósfera al instante de la captura; y el post-procesamiento, corresponde a los cálculos de los índices respectivos para la estimación de vegetación, cuerpos de agua y zonas de sal.

**Figura 3-1 Etapas de trabajo en imágenes multiespectrales WorldView.**

A continuación, se entrega mayor información sobre el procedimiento de corrección atmosférica aplicado a las imágenes WorldView, junto con la descripción de la metodología para el cálculo de los índices de presencia de vegetación y de presencia de agua.



3.1.1.1 Corrección Atmosférica

A las Imágenes multispectrales de la serie WorldView-2 y Geoeye-1, se realizaron correcciones tendientes a mejorar los errores de captura del sensor. Para ello, se utilizó el método IARR (Internal Average Relative Reflectance), el cual emplea un desarrollo matemático que disminuye el efecto de la interacción de las moléculas y partículas de la atmósfera (vapor de agua, partículas de polvo, entre otras), en relación a la radiación electromagnética captada por el satélite (BRIZUELA, AGUIRRE, & VELASCO, 2009).

3.1.1.2 Índice para el cálculo de Vegetación - Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI)

Para la estimación de la cobertura vegetal se utilizó el índice NDVI, el cual tiene como objetivo entregar la respuesta espectral aproximada de la vegetación aparente ($NDVI > 0$), proporcionando una máscara de corte que represente la presencia de vegetación en el sector.

Cabe destacar que este índice (NDVI), independiente de las ventajas ampliamente aceptadas en definir la vegetación, tiene el inconveniente de ser sensible a la reflectividad del suelo sobre el que se sitúa la planta, lo que limita su potencial de discriminación, situación agravada en los sectores extremos del sistema, donde los distintos tipos de suelos como, suelo vegetación muy dispersa, suelos desnudos o grandes coberturas de sal, están en gran abundancia. La representación matemática del NDVI se presenta en la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Donde:

$p_i R$:banda roja

$p_i IRC$: banda infrarrojo cercano

3.1.1.3 Segmentación de vegetación según NDVI

Una vez determinado el índice NDVI para cada sistema analizado, se realiza la segmentación del área que cuenta con posibilidad de albergar vegetación ($NDVI > 0$) según intervalos de valor de NDVI. Estos intervalos darán cuenta de las zonas con mayor actividad fotosintética y vigorosidad de la vegetación, permitiendo reconocer cuales son los patrones de distribución espacial de la vegetación.

3.1.2 Recopilación de información histórica de monitoreo –quebrada San Nicolás

Como parte del análisis, se recopila la información histórica del monitoreo de vegetación realizado en quebrada San Nicolás. De la información se analizarán las series de tiempo de cobertura de la vegetación (como % ocupación del suelo) y la riqueza (N° de especies presentes), de un punto histórico de seguimiento denominado San Nicolás 1.

3.2 Determinación de la demanda hídrica de los sistemas

La demanda hídrica total de los humedales, en este caso de las quebradas San Nicolás y Sallihuinka, está compuesta por tres componentes principales, cuya suma permitirá mantener las condiciones hídricas ambientales necesarias para la conservación del sistema vegetacional presente en la quebrada. Cabe señalar que por mantención de las condiciones hídricas se considera, suplir la demanda hídrica realizada por los flujos superficiales y subsuperficiales junto con aquella asociada al consumo de agua por parte de la vegetación.

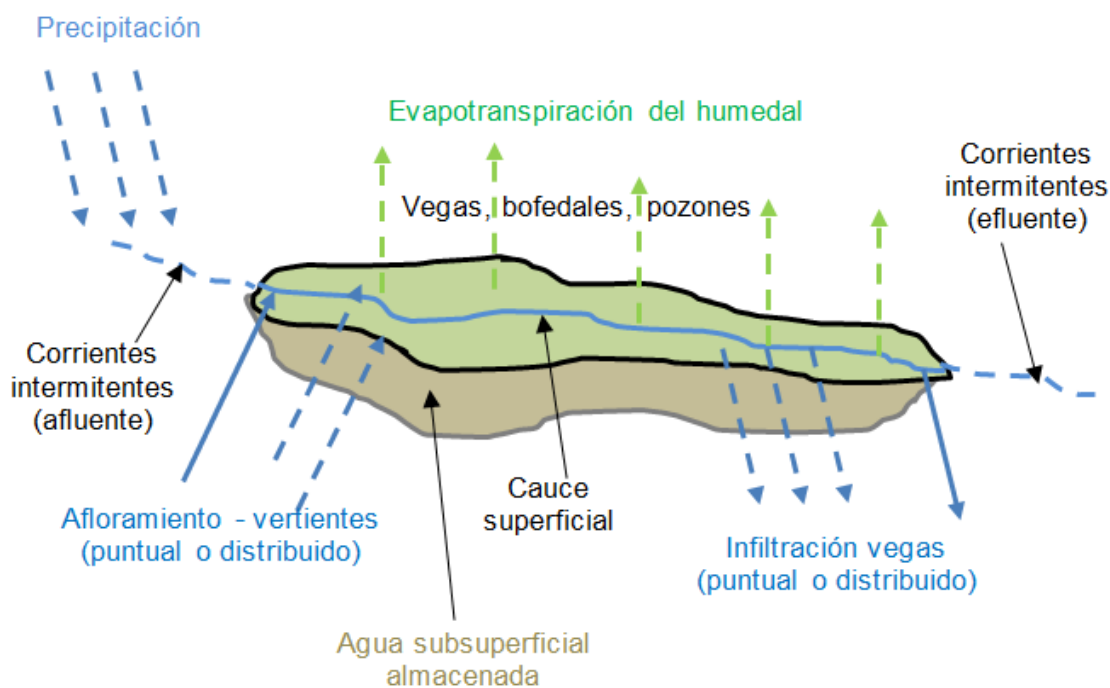
Así, a continuación se entregan las metodologías que permiten realizar la estimación de estas componentes, caudales superficiales y subsuperficiales necesarios para mantener las condiciones hídricas ambientales, junto con la metodología para determinar la demanda de agua asociada al requerimiento fisiológico de la vegetación (evapotranspiración).

3.2.1 Representación del balance hídrico en sistemas de vegas y bofedales

El estudio se centra en la estimación de las demandas hídricas sobre la base de información disponible e información levantada en terreno. A partir de información aportada por imágenes satelitales, se realizó la delimitación del humedal de quebrada Sallihuinka, área que es entendida como relevante en la estimación de la demanda hídrica que permitirá sostener su funcionamiento ecológico. Un esquema conceptual de los flujos de agua en los ecosistemas de bofedal, se entrega en la Figura 3-2.

A continuación, se entregan las metodologías para la determinación del flujo superficial (corrientes intermitentes y flujo en cauce principal), del flujo asociado a la evapotranspiración del humedal, y del flujo subsuperficial asociado a la permeabilidad del suelo.

Figura 3-2. Esquema conceptual del balance hídrico de los sitios a estudiar.



3.2.2 Registro de escurrimientos superficiales (aforos)

En los sitios en los que se pudo observar escurrimientos superficiales, se realizan aforos para medir los caudales pasantes superficiales. Dentro de lo posible, se escogen sectores a la entrada y salida de las vegas y bofedales estudiados.

La medición de los caudales se realizó mediante el método área-velocidad, para el que se subdivide el área de la sección transversal en celdas (Figura 3-3). El caudal se calcula como la integración de los caudales de cada celda, como se indica en la ecuación a continuación:

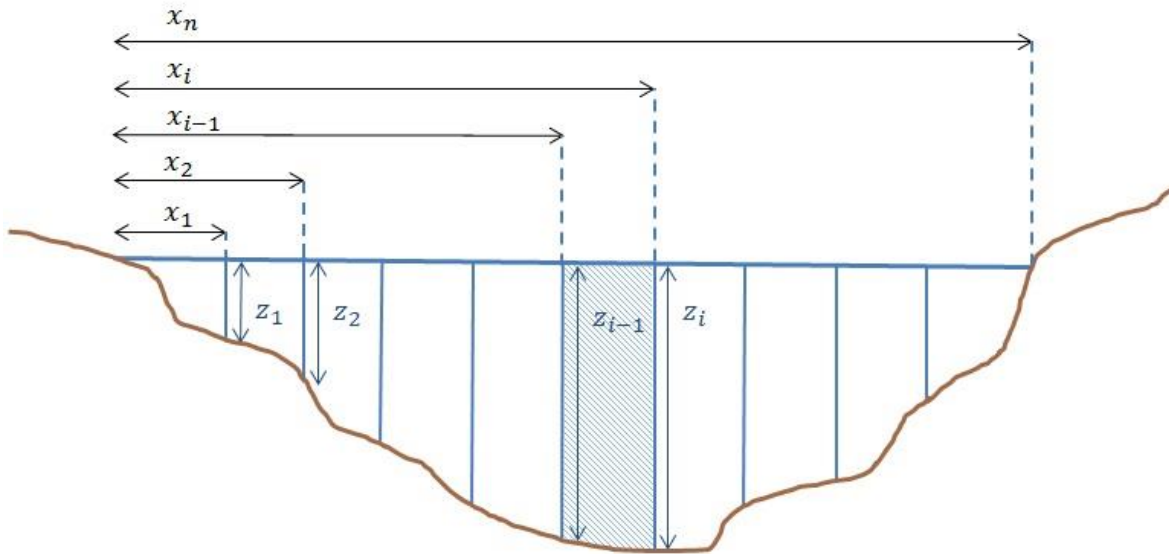
$$Q = \int_{x_0}^{x_n} (\bar{v} \cdot z) \delta x$$

Esta integral se puede aproximar mediante la suma de trapezoides, de la siguiente forma:

$$Q \approx \sum_{i=1}^n \frac{\bar{v}_i \cdot z_i + \bar{v}_{i-1} \cdot z_{i-1}}{2} \cdot (x_i - x_{i-1})$$

Donde \bar{v}_i corresponde a la velocidad media en la vertical en el punto de medición i , z_i a la profundidad en el punto de medición i y x_i a la distancia horizontal desde la ribera hasta el punto de medición i , como se esquematiza en la Figura 3-3. Además, para esta aproximación se considera $\bar{v}_0, z_0, x_0, \bar{v}_n, z_n = 0$.

Figura 3-3: Esquema de la sección transversal y la subdivisión en celdas.



Para la medición en terreno, en primer lugar se escoge una sección transversal que presente caudal suficiente para la medición y que sea adecuada para el aforo, es decir, que cuente con la menor cantidad de obstáculos e idealmente en un tramo recto. Una vez escogida la sección transversal se procede a realizar el aforo, midiendo a lo largo

de la sección transversal la distancia x , la profundidad H y la velocidad v . La cantidad de puntos de medición es variable y depende de lo que permita la sección transversal.

Para el cálculo de la velocidad media, se deben realizar distintas observaciones de velocidad en cada vertical dependiendo de la profundidad del curso de agua. Para secciones de poca profundidad (menores a 60 cm), como es el caso de los sectores estudiados, se realizan observaciones en cada vertical colocando el instrumento al 60% de la profundidad total por debajo de la superficie libre. En la Tabla 3-2 se presentan los métodos considerados para la estimación de la velocidad media según distintos rangos de profundidad (H), y se puede apreciar que para profundidades pequeñas se puede estimar la velocidad media con una única medición en la vertical.

Tabla 3-2: Puntos de medición y estimación de la velocidad media.

N° mediciones	Profundidad H [cm]	Puntos de observación (desde la superficie libre)	Velocidad media
1	0 – 60	$0,6 H$	$\bar{v} = v_{0,6}$
2	60 – 300	$0,2 H$ y $0,8 H$	$\bar{v} = 0,5 \cdot (v_{0,2} + v_{0,8})$
3	300 – 600	$0,2 H$, $0,6 H$ y $0,8 H$	$\bar{v} = 0,25 \cdot (v_{0,2} + 2 \cdot v_{0,6} + v_{0,8})$

Para la medición de la velocidad se utiliza un Correntómetro Global Water, Modelo FP111 (ver Figura 3-4), el cual tiene una precisión de 0,05 m/s.

Figura 3-4: Instrumento utilizado para el aforo: correntómetro FP111.



Las mediciones de velocidad fueron realizadas dos veces para cada punto, por lo que fue posible determinar un caudal medio. El error asociado a las mediciones se estimó a partir del error producido en las velocidades medidas (0,05 m/s).

Es importante tener en cuenta que, al realizar mediciones con instrumentos, existen errores propios de la medición, los cuales se pueden propagar hacia el resultado final. Para considerar esto, se estiman los errores de cada medición y se calcula su

propagación al realizar operaciones matemáticas con ellos. Las variables medidas según el procedimiento de aforo y sus respectivos errores adoptados son:

Tabla 3-3: Variables medidas y errores asociados

Variable	Error
Distancia transversal (x_i)	$\sigma^2_x = 0,005$ [m]
Profundidad (z_i)	$\sigma^2_z = 0,005$ [m]
Velocidad puntual (v_i)	$\sigma^2_v = 0,050$ [m/s]

Con estas variables se realizan cálculos de sumas y/o multiplicación, cuyo error se propaga según las siguientes expresiones:

Tabla 3-4: Propagación de errores en operaciones

Función	Error
$f = aA \pm bB$	$\sigma_f^2 = a^2 \sigma_A^2 + b^2 \sigma_B^2$
$f = aAB$	$\left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2$
$f = aA^{\pm b}$	$\frac{\sigma_f}{f} = b \frac{\sigma_A}{A}$

Donde A y B son variables independientes entre sí, mientras que a y b son constantes.

Finalmente, en el contexto de las mediciones realizadas para esta componente, se cuenta con información de campañas de terreno realizadas en las cuatro temporadas del año, y que fueron desarrolladas entre el año 2016 y 2017. Las fechas de las campañas y las condiciones de acceso a los sitios se muestran en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Fechas de realización de campaña de terreno.

Sistema	Puntos	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Visitado en terreno			
				may-16	mar-17	jun-17	sep-17
San Nicolás	AFO-SC1	7681112	524780	(*)	(**)	(**)	(*)
	AFO-SC2	7679384	526798	(*)	(*)	(**)	(*)
	AFO-SC3	7681096	524779	(*)	(*)	(*)	(*)
Sallihuinca	AFO-SA1	Sin punto aforado		(*)	(*)	(*)	(*)

(*) Sitio con acceso

(**) Sin posibilidad de acceso



3.2.3 Medición de evapotranspiración asociada a grupos vegetacionales

La medición de la evapotranspiración (ET) con domos corresponde a la determinación directa de la suma de dos procesos presentes en un área determinada que cuente con presencia de vegetación, ellos corresponden a la evaporación de agua directa desde el suelo y a la transpiración de la vegetación contenida en el área. Ambos procesos traspasan humedad (agua) desde la matriz suelo-planta hacia la atmósfera. El conocimiento de la magnitud de este proceso conjunto es esencial en la cuantificación y optimización del agua en los sistemas agrícolas y en los ecosistemas áridos. En particular, la medición de las tasas de evapotranspiración permite determinar los requerimientos hídricos de la vegetación presente, entendida como una de las componentes de un balance hídrico del sitio. Cabe señalar que existen métodos micro-meteorológicos para la determinación de la evapotranspiración, pero la metodología no es práctica para ser aplicada en zonas con diferentes tipos de vegetación y en áreas pequeñas, debido al error asociado a la advección de condiciones por el viento.

Los métodos que utilizan cámaras portables de evapotranspiración, como el que se aplicó en este estudio, se utilizan para determinar la evapotranspiración en áreas pequeñas con diferentes tipos de vegetación. Estas cámaras han sido utilizadas para medir ET de campos de cultivo de alfalfa, suelo desnudo y comunidades vegetacionales. También han sido utilizadas para determinar ET de distintos tipos de vegetación, dentro de comunidades de especies mezcladas.

El principio de operación de este método (Stannard, 1988; McLeod et al, 2004; USGS, 2008) es la determinación de un aumento en la densidad del vapor dentro de la cámara portable, mientras esta permanece sobre la vegetación o sobre suelo desnudo. La medición de la densidad de vapor se realiza por un periodo no mayor a 1 minuto. Al terminar la medición se remueve la cámara antes que la evapotranspiración disminuya, debido a que las plantas responden a mayores concentraciones de vapor o CO_2 dentro de la cámara. Para asegurar que se obtendrá una muestra representativa, se utilizan pequeños ventiladores para mezclar el aire y vapor de agua dentro de la cámara. El aumento de la densidad de vapor dentro de la cámara es proporcional a la ET y estas mediciones se repiten varias veces a lo largo del día para obtener valores de ET diaria.

Para realizar las mediciones, se ejecutaron 4 campañas de terreno, coincidentes con las fechas entregadas en la sección anterior, y en la Tabla 3-5 .

El uso de este tipo de equipos requiere de la calibración del equipo, asegurando una correcta medida en el campo. Es por ello que a continuación, se entregan las metodologías de calibración del equipo junto con la metodología definida para la realización de las mediciones de campo.

3.2.3.1 Calibración del equipo

Debido a que el material utilizado en la construcción de la cámara y de los equipos en su interior (acrílico de 4 mm, ventiladores, soportes, junta y sensor de humedad) pueden ser hidrofílicos, se requiere de una calibración asociada. Con ello, se determinar el error dado por la absorción de vapor, además de corregir los posibles errores por mezcla imperfecta y errores del sensor.

Los materiales utilizados en el proceso de calibración del equipo son los siguientes:

- Cámara de evapotranspiración (domo de acrílico de 5 mm de espesor, con 120 cm de diámetro y 50 cm de alto).



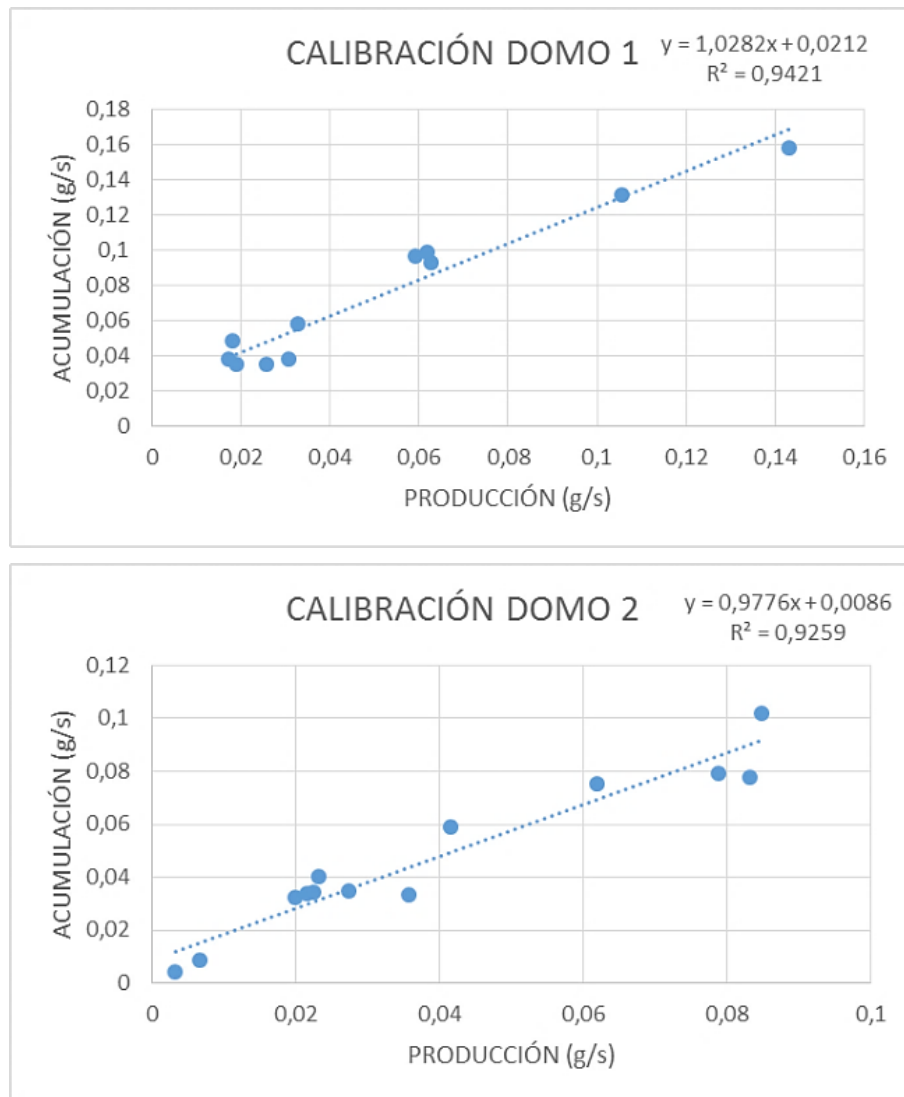
- Sensor de humedad Vaisala MI70 con registro de parámetros de temperatura, humedad relativa y humedad absoluta.
- Balanza digital (rango 0-1000g y sensibilidad de 0,01g).
- Vaso de precipitado (1000mL).
- Calentador de agua instalado en soporte universal con pinza de tres dedos.
- 2 baterías de 12 V y 33 Ah, fuente de poder, microcontrolador y computadora portátil.
- 2 ventiladores pequeños de alta potencia (compuesto por un motor y un aspa de 8 cm aproximadamente cada uno).
- Ventosas de sujeción con soporte para ventiladores.
- Cámara fotográfica.

La calibración del domo se realiza mediante la generación de evaporación controlada de agua al interior del domo, la cual es registrada y posteriormente procesada para la construcción de la curva de calibración. Esto se realiza calentando e hirviendo el agua dentro del domo para generar una tasa de evaporación aproximadamente constante en su interior. La tasa de evaporación se determina midiendo la pérdida de masa desde el recipiente que contiene el agua, este registro es realizado utilizando una balanza de precisión. A la vez, se monitorea el aumento de densidad de vapor dentro de la cámara utilizando un sensor Vaisala con registro de humedad relativa y temperatura.

3.2.3.1.1 Calibración para campaña de mayo de 2016

La determinación del factor de calibración (C) se realizó graficando la masa de agua perdida desde el recipiente, medida con la balanza, versus la masa de agua evaporada, calculada a través del método de medición (parámetros HR y T). Se determinó un factor de calibración igual a 1,028 para el domo 1 y de 0,978 para el domo 2 (Figura 3-5). Estos coeficientes se utilizan finalmente para corregir los valores medidos en terreno, con el objetivo de obtener una medición similar a la realidad representada por la balanza de precisión.

Figura 3-5. Ajuste para la calibración del Domo 1 (panel superior) y Domo 2 (panel inferior). Fuente: Arcadis (2016a).



3.2.3.1.2 Calibración para campañas de marzo, junio y septiembre de 2017

El proceso es realizado bajo diferentes condiciones ambientales y de evaporación forzada en el interior de la cámara, siguiéndose los siguientes pasos en este caso:

- Se hierve el agua dentro del vaso de precipitado utilizando un calentador de agua sobre la balanza, con 5 voltajes diferentes (40, 50, 60, 70 y 80V).
- Para cada voltaje se registra la pérdida de masa de agua del vaso mediante el registro fotográfico y la posterior lectura del descenso del agua en su interior.
- Conjuntamente se registra la humedad relativa y la temperatura dentro de la cámara a intervalos de 5 segundos y por un periodo de 2 minutos.
- Lo anterior es repetido bajo tres velocidades de los ventiladores instalados al interior de la cámara, y correspondientes a 3, 4 y 5 km/h.

- Cabe señalar que cada medición, combinación de voltaje y velocidad de ventilador, es repetida tres veces.

Para obtener la tasa de producción de vapor se grafica la pérdida de masa de agua versus el tiempo, obteniéndose la pendiente de sección de la línea recta (Figura 3-7). De igual forma, el aumento de vapor se grafica contra el tiempo para obtener la tasa de acumulación de vapor (Figura 3-8). Luego, se grafican las tasas de acumulación de vapor versus las tasas de producción de vapor, y se le realiza un ajuste lineal a los datos considerando que esta recta tiene su origen donde ambas tasas son nulas (punto [0,0]). Finalmente, la pendiente de este último ajuste corresponderá al factor de calibración de la cámara (Figura 3-8).

Figura 3-6. Pendiente de la línea recta en gráfico de pérdida de masa de agua versus tiempo.

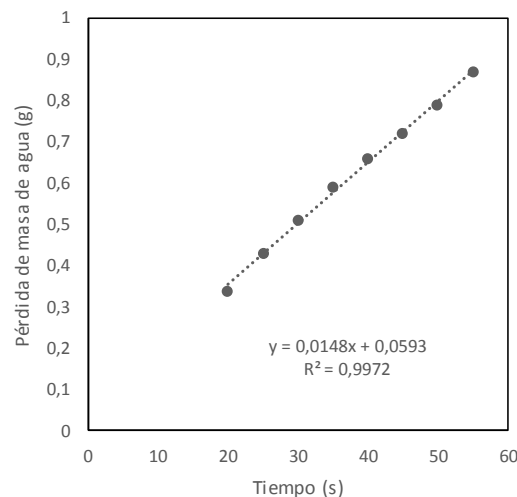


Figura 3-7. Pendiente de la línea recta en gráfico de densidad de vapor versus tiempo.

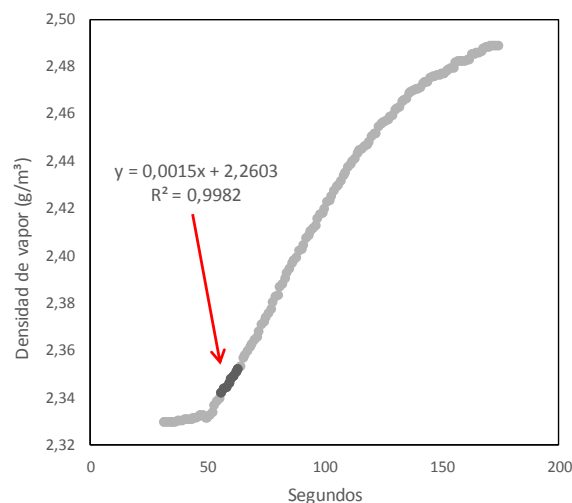
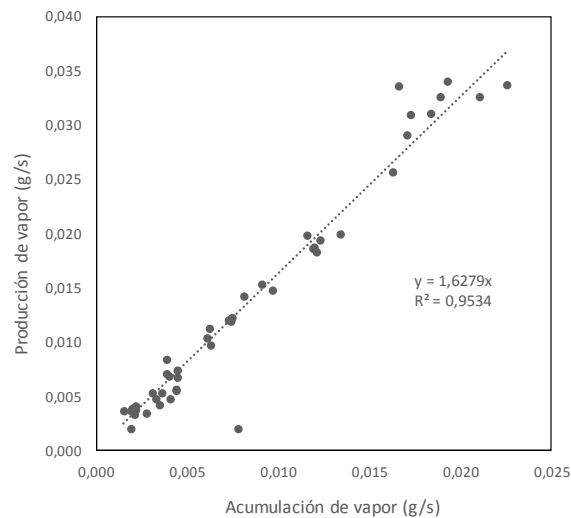


Figura 3-8. Gráfico de la tasa de producción de vapor versus la acumulación de vapor dentro de la cámara de evapotranspiración.

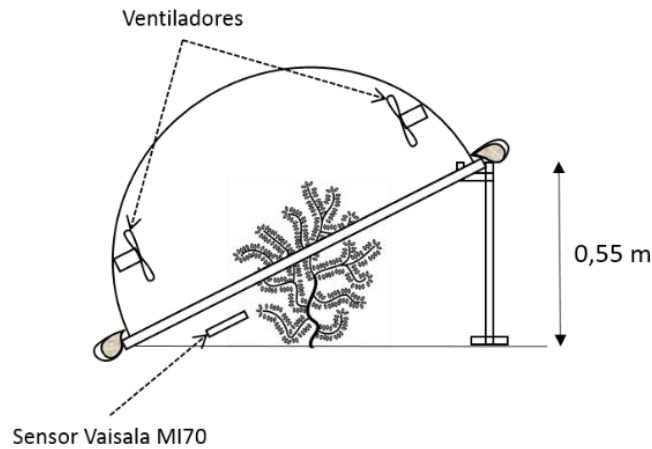


3.2.3.2 Medición de terreno

Los materiales de terreno utilizados en las mediciones de evapotranspiración mediante el uso de la cámara o domo de evapotranspiración son los siguientes:

- Cámara de evapotranspiración (domo de acrílico de 5 mm de espesor, con 120 cm de diámetro y 50 cm de alto).
- Sensor de humedad Vaisala MI70 con registro de parámetros de temperatura, humedad relativa y humedad absoluta.
- 2 baterías de 12 V y 33 Ah, fuente de poder, microcontrolador y computadora portátil.
- 2 ventiladores pequeños de alta potencia (compuesto por un motor y un aspa de 8 cm aproximadamente cada uno).
- Ventosas de sujeción con soporte para ventiladores.
- Sello para el borde inferior del domo.

En el lugar seleccionado para las mediciones, se realiza la instalación el domo de acrílico junto con los materiales señalados anteriormente, ubicando el domo de forma que cubra la especie o el conjunto de especies (vegetación) seleccionada como representativa para la medición y como se aprecia en la Figura 3-9. Antes de iniciar la medida se activan los ventiladores y se mantiene el domo elevado e inclinado (ver Figura 3-9) cerca de un minuto, con esto es posible adecuar la humedad al interior del domo con el ambiente. Para comenzar la medición se retira rápidamente el sujetador del domo y se dispone el domo de forma que cubra por completo el lugar seleccionado. Esta medida durará como mínimo 1 minuto, registrándose los valores de temperatura, humedad relativa y humedad absoluta dentro del domo con el medidor Vaisala. Transcurrido el minuto de medición, se levanta el domo para su ventilación apoyándolo en el sujetador, conjuntamente se detendrán los ventiladores y el registro del Vaisala. Las mediciones serán repetidas cada media hora.

Figura 3-9 Esquema de cámara de evapotranspiración previo a la medición**Vista lateral**

Durante la campaña de mayo de 2016, en cada punto de medición de evapotranspiración se midió también la permeabilidad al menos en 2 puntos, a una pequeña distancia de la zona donde se midió la evapotranspiración con la metodología del domo.

3.2.3.3 Cálculo de evapotranspiración

El cálculo de la evapotranspiración se basa en los datos de humedad relativa y temperatura obtenidos en terreno y en cada medición (a intervalos de 30 minutos aproximadamente), con los que es posible calcular la tasa de aumento de densidad de vapor dentro de la cámara. Esto incluye cálculos de la presión de saturación de vapor, la presión parcial de vapor, la densidad de vapor, el cálculo de la pendiente de del ajuste lineal del gráfico de densidad de vapor versus el tiempo, la tasa instantánea de cada medición, y la evapotranspiración diaria total (mm).

La presión de saturación de vapor (e_s) puede ser calculada como:

$$e_s = 6,11 f(P) \exp\left(\frac{17,5t}{241,2 + t}\right)$$

Donde t es la temperatura en °C y $f(P)$ se asume como un valor constante igual a 100,47; el cual se encuentra relacionado con la presión atmosférica.

La presión parcial de vapor, e (Pa), se calcula utilizando los datos de humedad relativa (HR) como

$$e = \frac{HR \times e_s}{100}$$

La densidad de vapor, ρ_v (g/m³), se estima por medio de la siguiente relación.

$$\rho_v = \left(\frac{0,622e}{R_d T}\right) \times 1000$$

Donde R_d es la constante de los gases (287,04/kg °K) y T es la temperatura en grados Kelvin. El factor 0,622 corresponde a la proporción de los pesos moleculares de agua (g/mol) y aire seco.



La pendiente de la sección de la línea recta del gráfico de densidad de vapor al interior de la cámara versus el tiempo, se obtiene utilizando el método de los mínimos cuadrados. La sección de la línea recta, por lo general, se obtiene durante los primeros 30 segundos de los datos medidos. Este valor se utiliza en la siguiente ecuación para calcular la tasa de ET instantánea (mm/h) en un período de tiempo particular del día.

$$ET = 3,6 \frac{MVC}{A}$$

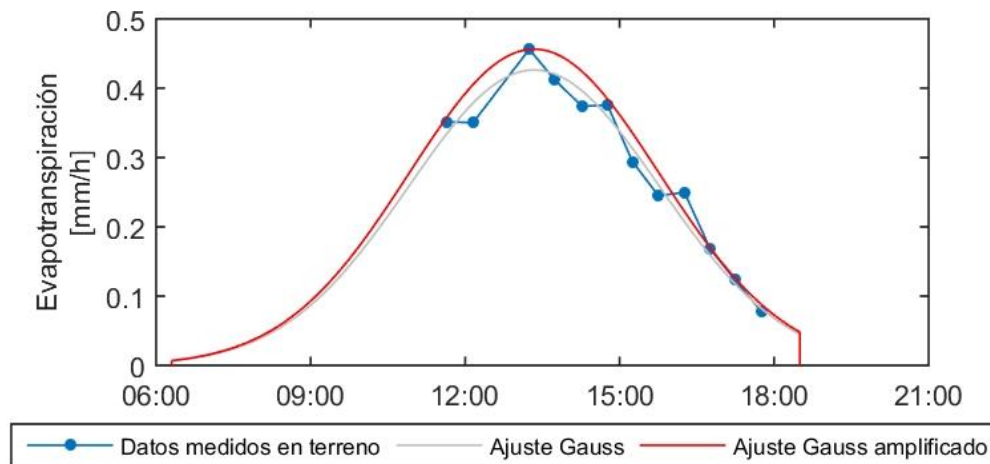
Donde ET es la evapotranspiración (mm/h), M es la pendiente de la sección de la línea recta (g/m³), V es el volumen dentro de la cámara (m³), C es el factor de calibración que da cuenta de la absorción de vapor por el acrílico, A es el área de superficie de suelo cubierto por la cámara (m²) y el factor de 3,6 es utilizado para la conversión de la unidades de (gramos de agua/m²*s) a una tasa horaria en (mm/h). Este cálculo es realizado para cada una de las mediciones realizadas, requiriéndose la integración de la información en una curva diaria que permita determinar (totalizar) la cantidad diaria requerida por los sistemas. En general, el cálculo de la ET total diaria se realiza mediante la estimación del área bajo la curva generada al graficar las tasas de ET horarias medidas en el tiempo, pero debido a que no siempre es posible medir todo el ciclo diario (p.ej. restricciones de horario, de acceso, de seguridad, entre otras), se desarrolló una metodología para aproximar la curva diaria. Esta aproximación permite interpretar las mediciones de terreno, junto con definir una curva de evapotranspiración diaria que, en cierta forma, aísla las condiciones particulares del día de la medición (p.ej. paso de nubes, ráfagas de viento ocasionales, entre otros) y entrega una mejor aproximación al proceso bajo las condiciones de la temporada en que se registre.

Así, la metodología para el ajuste de la curva diaria de evapotranspiración por cada serie diaria de medición, utilizan como base los registros de terreno (serie azul en Figura 3-10). Los datos medidos en terreno son completados con los valores aproximados del inicio de la actividad de la vegetación y del término de ella, mediante la determinación de la salida y puesta de sol local durante el día de la medición. Con ello se completa la serie medida con valores de cero evapotranspiración en ambas horas. A la serie anterior, se les ajusta una función normal que logre dar cuenta de la variación diaria (serie *Ajuste* en Figura 3-10). Cabe señalar que en los casos en que el ajuste no logre ser cercano a cero en los horarios de inicio y fin de actividad de la vegetación, la curva de ajuste será truncada en ambos horarios, imponiendo un valor cero, como se observa en la Figura 3-10.

El ajuste anterior, el cual logra representar de buena forma los datos medidos en terreno, es nuevamente ajustado para que dé cuenta de los valores máximos registrados en la medición. Esto último nace de considerar que cualquier desviación generada en la medición, sea ella generada por la técnica de medición o por condiciones atmosféricas locales y del momento, siempre corresponderá a una reducción en los valores medidos. Es por lo anterior, que se considera que los valores máximos registrado deben ser incluidos en el ajuste final, permitiendo representar los valores de máxima demanda del sistema. Para lograr su inclusión, se determina la proporción existente del máximo valor y la primera curva de ajuste en esa misma hora, teniéndose un factor de proporcionalidad (factor de amplificación) para el ajuste requerido. Este factor es aplicado valor a valor sobre la curva de ajuste inicial, teniéndose finalmente una curva de ajuste de tipo normal como la serie "*Ajuste Amplificado*" de la Figura 3-10.

Una vez conseguida la función de ajuste que representa la curva de ET diaria local de referencia, se obtiene el valor de ET diario medio mediante la integración del área bajo la curva, obteniéndose el valor de la evapotranspiración acumulada por día en milímetros por día (mm/día).

Figura 3-10 Ejemplo del ajuste de curva de evapotranspiración diaria a registro de terreno. Se entregan la curva medida en terreno (azul), la curva de ajuste intermedio (en gris) y la curva de ajuste final (rojo).



La evapotranspiración recién mencionada corresponde a la evapotranspiración del cultivo particular al cual se le realiza la medición (ET_c). Sin embargo, ésta puede ser expresada en función de la evapotranspiración potencial del lugar en donde se realiza la medición (ET_0), según la siguiente expresión:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0$$

Donde K_c corresponde a un coeficiente de cultivo, el cual varía dependiendo de la vegetación en estudio. En el presente análisis, siguiendo la misma analogía, se realiza un ajuste similar según la siguiente expresión:

$$ET_c = K1_c \cdot ET_0 + K2_c$$

En este caso se tienen 2 coeficientes de ajuste, $K1_c$ y $K2_c$, que representan de mejor manera la relación entre la evapotranspiración de un cultivo de referencia y el cultivo complejo de las quebradas estudiadas, donde además de distintos tipos de vegetación de climas extremos combinados, se tiene suelos saturados de agua. La saturación del suelo corresponde a una condición característica de un humedal, e implica una mayor evaporación de agua desde el suelo, provocando que se logre tener una medida (registro) de evapotranspiración, incluso cuando la evapotranspiración de referencia es nula, y lo cual se asocia principalmente a evaporación directa desde el suelo prácticamente saturado.



Para la estimación de la Evapotranspiración de referencia (ET_0) se tiene distintos métodos, desarrollados cada uno de ellos por distintos autores. Una metodología simplificada, y que posibilita realizar una estimación con pocas variables ambientales (ligadas a la atmósfera principalmente), corresponde a la Ecuación de Hargreaves (FAO, 2006), la cual calcula la evapotranspiración potencial con la siguiente expresión:

$$ET_0 = 0,0023 \cdot (T_{media} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a$$

Donde T corresponde a la temperatura del aire medida a 2 metros de altura y expresada en grados Celsius. La variable R_a corresponde a la radiación extraterrestre expresada en milímetros por día, al igual que ET_0 . A continuación, en las Tabla 3-6 y Tabla 3-7, se muestran los valores de la radiación extraterrestre en función de la latitud y mes del año.



Tabla 3-6 Radiación extraterrestre diaria (Ra) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes – Hemisferio Norte.

Latitud	Ra mensual, Hemisferio Norte											
Grados	Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic
70	0.0	2.6	10.4	23.0	35.2	42.5	39.4	28.0	14.9	4.9	0.1	0.0
68	0.1	3.7	11.7	23.9	35.3	42.0	38.9	28.6	16.1	6.0	0.7	0.0
66	0.6	4.8	12.9	24.8	35.6	41.4	38.8	29.3	17.3	7.2	1.5	0.1
64	1.4	5.9	14.1	25.8	35.9	41.2	38.8	30.0	18.4	8.5	2.4	0.6
62	2.3	7.1	15.4	26.6	36.3	41.2	39.0	30.6	19.5	9.7	3.4	1.3
60	3.3	8.3	16.6	27.5	36.6	41.2	39.2	31.3	20.6	10.9	4.4	2.2
58	4.3	9.6	17.7	28.4	37.0	41.3	39.4	32.0	21.7	12.1	5.5	3.1
56	5.4	10.8	18.9	29.2	37.4	41.4	39.6	32.6	22.7	13.3	6.7	4.2
54	6.5	12.0	20.0	30.0	37.8	41.5	39.8	33.2	23.7	14.5	7.8	5.2
52	7.7	13.2	21.1	30.8	38.2	41.6	40.1	33.8	24.7	15.7	9.0	6.4
50	8.9	14.4	22.2	31.5	38.5	41.7	40.2	34.4	25.7	16.9	10.2	7.5
48	10.1	15.7	23.3	32.2	38.8	41.8	40.4	34.9	26.6	18.1	11.4	8.7
46	11.3	16.9	24.3	32.9	39.1	41.9	40.6	35.4	27.5	19.2	12.6	9.9
44	12.5	18.0	25.3	33.5	39.3	41.9	40.7	35.9	28.4	20.3	13.9	11.1
42	13.8	19.2	26.3	34.1	39.5	41.9	40.8	36.3	29.2	21.4	15.1	12.4
40	15.0	20.4	27.2	34.7	39.7	41.9	40.8	36.7	30.0	22.5	16.3	13.6
38	16.2	21.5	28.1	35.2	39.9	41.8	40.8	37.0	30.7	23.6	17.5	14.8
36	17.5	22.6	29.0	35.7	40.0	41.7	40.8	37.4	31.5	24.6	18.7	16.1
34	18.7	23.7	29.9	36.1	40.0	41.6	40.8	37.6	32.1	25.6	19.9	17.3
32	19.9	24.8	30.7	35.5	40.0	41.4	40.7	37.9	32.8	26.6	21.1	18.5
30	21.1	25.8	31.4	36.8	40.0	41.2	40.6	38.0	33.4	27.6	22.2	19.8
28	22.3	26.8	32.2	37.1	40.0	40.9	40.4	38.2	33.9	28.5	23.3	21.0
26	23.4	27.8	32.8	37.4	39.9	40.6	40.2	38.3	34.5	29.3	24.5	22.2
24	24.6	28.8	33.5	37.6	39.7	40.3	39.9	38.3	34.9	30.2	25.5	23.3
22	25.7	29.7	34.1	37.8	39.5	40.0	39.6	38.4	35.4	31.0	26.6	24.5
20	26.8	30.6	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.3	35.8	31.8	27.7	25.6
18	27.9	31.5	35.2	38.0	39.0	39.1	38.9	38.2	36.1	32.5	28.7	26.8
16	28.9	32.3	35.7	38.1	38.7	38.6	38.5	38.1	36.4	33.2	29.6	27.9
14	29.9	33.1	36.1	38.1	38.4	38.1	38.1	38.0	36.7	33.9	30.6	28.9
12	30.9	33.8	36.5	38.0	38.0	37.6	37.6	37.8	36.9	34.5	31.5	30.0
10	31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37.0	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31.0
8	32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32.0
6	33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9
4	34.6	36.4	37.6	37.4	36.0	35.0	35.3	36.5	37.3	36.6	34.9	33.9
2	35.4	37.0	37.8	37.1	35.4	34.2	34.6	36.1	37.3	37.0	35.6	34.8
0	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6

Fuente: "Evapotranspiración del cultivo – Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". Estudio FAO – Riego y drenaje.



Tabla 3-7 Radiación extraterrestre diaria (Ra) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes – Hemisferio Sur.

Latitud	Ra mensual, Hemisferio Sur											
Grados	Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic
70	41.4	28.6	15.8	4.9	0.2	0.0	0.0	2.2	10.7	23.5	37.3	45.3
68	41.0	29.3	16.9	6.0	0.8	0.0	0.0	3.2	11.9	24.4	37.4	44.7
66	40.9	30.0	18.1	7.2	1.5	0.1	0.5	4.2	13.1	25.4	37.6	44.1
64	41.0	30.8	19.3	8.4	2.4	0.6	1.2	5.3	14.4	26.3	38.0	43.9
62	41.2	31.5	20.4	9.6	3.4	1.2	2.0	6.4	15.5	27.2	38.3	43.9
60	41.5	32.3	21.5	10.8	4.4	2.0	2.9	7.6	16.7	28.1	38.7	43.9
58	41.7	33.0	22.6	12.0	5.5	2.9	3.9	8.7	17.9	28.9	39.1	44.0
56	42.0	33.7	23.6	13.2	6.6	3.9	4.9	9.9	19.0	29.8	39.5	44.1
54	42.2	34.3	24.6	14.4	7.7	4.9	6.0	11.1	20.1	30.6	39.9	44.3
52	42.5	35.0	25.6	15.6	8.8	6.0	7.1	12.2	21.2	31.4	40.2	44.4
50	42.7	35.6	26.6	16.7	10.0	7.1	8.2	13.4	22.2	32.1	40.6	44.5
48	42.9	36.2	27.5	17.9	11.1	8.2	9.3	14.6	23.3	32.8	40.9	44.5
46	43.0	36.7	28.4	19.0	12.3	9.3	10.4	15.7	24.3	33.5	41.1	44.6
44	43.2	37.2	29.3	20.1	13.5	10.5	11.6	16.8	25.2	34.1	41.4	44.6
42	43.3	37.7	30.1	21.2	14.6	11.6	12.8	18.0	26.2	34.7	41.6	44.6
40	43.4	38.1	30.9	22.3	15.8	12.8	13.9	19.1	27.1	35.3	41.8	44.6
38	43.4	38.5	31.7	23.3	16.9	13.9	15.1	20.2	28.0	35.8	41.9	44.5
36	43.4	38.9	32.4	24.3	18.1	15.1	16.2	21.2	28.8	36.3	42.0	44.4
34	43.4	39.2	33.0	25.3	19.2	16.2	17.4	22.3	29.6	36.7	42.0	44.3
32	43.3	39.4	33.7	26.3	20.3	17.4	18.5	23.3	30.4	37.1	42.0	44.1
30	43.1	39.6	34.3	27.2	21.4	18.5	19.6	24.3	31.1	37.5	42.0	43.9
28	43.0	39.8	34.8	28.1	22.5	19.7	20.7	25.3	31.8	37.8	41.9	43.6
26	42.8	39.9	35.3	29.0	23.5	20.8	21.8	26.3	32.5	38.0	41.8	43.3
24	42.5	40.0	35.8	29.8	24.6	21.9	22.9	27.2	33.1	38.3	41.7	43.0
22	42.2	40.1	36.2	30.6	25.6	23.0	24.0	28.1	33.7	38.4	41.4	42.6
20	41.9	40.0	36.6	31.3	26.6	24.1	25.0	28.9	34.2	38.6	41.2	42.1
18	41.5	40.0	37.0	32.1	27.5	25.1	26.0	29.8	34.7	38.7	40.9	41.7
16	41.1	39.9	37.2	32.8	28.5	26.2	27.0	30.6	35.2	38.7	40.6	41.2
14	40.6	39.7	37.5	33.4	29.4	27.2	27.9	31.3	35.6	38.7	40.2	40.6
12	40.1	39.6	37.7	34.0	30.2	28.1	28.9	32.1	36.0	38.6	39.8	40.0
10	39.5	39.3	37.8	34.6	31.1	29.1	29.8	32.8	36.3	38.5	39.3	39.4
8	38.9	39.0	37.9	35.1	31.9	30.0	30.7	33.4	36.6	38.4	38.8	38.7
6	38.3	38.7	38.0	35.6	32.7	30.9	31.5	34.0	36.8	38.2	38.2	38.0
4	37.6	38.3	38.0	36.0	33.4	31.8	32.3	34.6	37.0	38.0	37.6	37.2
2	36.9	37.9	38.0	36.4	34.1	32.6	33.1	35.2	37.1	37.7	37.0	36.4
0	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6

Fuente: "Evapotranspiración del cultivo – Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". Estudio FAO – Riego y drenaje



3.2.4 Medición de permeabilidad de suelos en sitios de vegas

Las medidas de permeabilidad se realizaron en el contexto del estudio “Mediciones de terreno en quebradas y estimación caudales pasantes” elaborada por Arcadis (Arcadis, 2017), y en donde se utilizó un permeámetro de Guelph (ver Figura 3-11). Este permeámetro consta de dos tubos concéntricos de diferentes diámetros. Uno actúa como depósito de agua y el otro de menores dimensiones que se pone en contacto con el suelo, lleva acoplado un sistema que permite mantener una carga hidráulica constante.

El procedimiento de medición de conductividad hidráulica usando permeámetro consiste en medir la velocidad con que cambia el nivel de agua en un cilindro en la medida que el agua es absorbida por el suelo.

El permeámetro de Guelph es un permeámetro de carga constante que utiliza el principio de Mariotte. El método incluye medir la tasa en régimen permanente de recarga de agua en el suelo no saturado (en un orificio perforado), en el cual la carga de agua se mantiene constante.

Para realizar las medidas de permeabilidad primero se ha de realizar una perforación con barreno con una profundidad no mayor a 38 cm. En la mayoría de los suelos el proceso de perforación con barreno implica la formación de una capa en los bordes que impermeabiliza el suelo y afecta a la medida. Se recomienda utilizar cepillo para limpiar y reacondicionar la perforación.

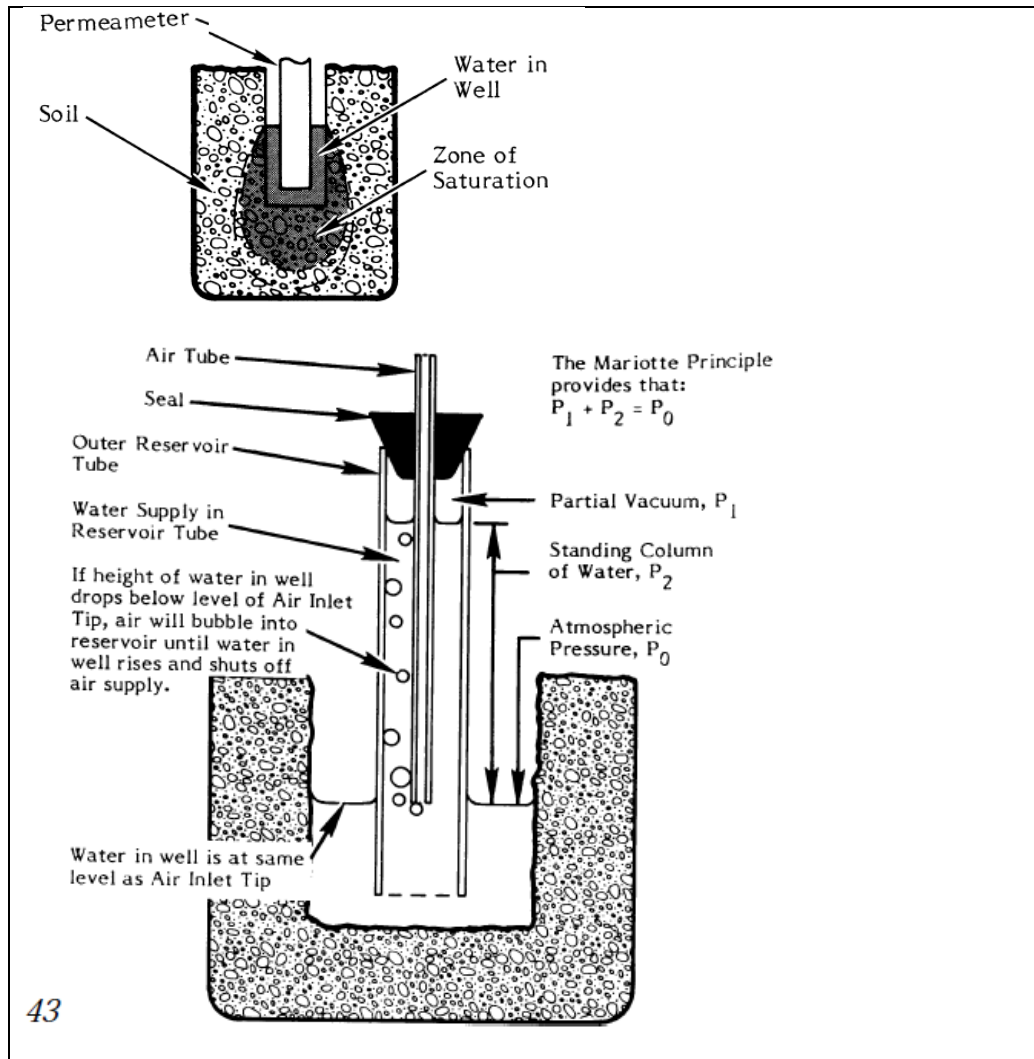
Posteriormente se procede al llenado del permeámetro, para lo cual se debe retirar el tapón situado en la parte superior del reservorio asegurándose que la válvula reguladora del flujo esté con su indicador hacia arriba para mantener conectados el reservorio interior y exterior.

Para instalar el equipo en el agujero de infiltración, simplemente se debe bajar lentamente el permeámetro a través del trípode y procurar que el tubo de soporte no golpee las paredes del agujero.

Cuando el agujero perforado supera los 38 cm de profundidad el permeámetro se posiciona sin el trípode, utilizando el soporte deslizante sobre el terreno para obtener la estabilidad del equipo.

Para la recolección de datos, hay primero que verificar la configuración del permeámetro, confirmando que la válvula de la base del recipiente está con el indicador hacia arriba, el indicador del nivel de agua asentado en la base de la tapa del permeámetro, el orificio para llenar el permeámetro tapado y el tubo de vacío correctamente sellado.

Una vez verificado se ha de establecer la altura del nivel de agua en el agujero mediante el indicador de altura en la parte superior del permeámetro y seleccionar el reservorio adecuado. Si la velocidad de descenso es muy lenta se ha de seleccionar el reservorio interior girando el indicador hacia abajo. Una vez que se selecciona el reservorio éste no puede ser cambiado durante el ensayo.

Figura 3-11: Descripción del permeámetro de Guelph.

Fuente: Instrucciones de operación 2800K1(www.soilmoisture.com)

Una vez que se ha seleccionado el reservorio y la carga que se va a aplicar (habitualmente son 5 y 10 cm) se dejan pasar 2 minutos antes de comenzar. Este es el tiempo que se estima necesario para que la tierra alrededor de la perforación se sature. Después de los dos minutos se empiezan a tomar datos. El ensayo se detiene cuando existan al menos 3 tasas sucesivas iguales, lo que indica que se encuentra en régimen permanente. Los datos se registran cada 1 ó 0.5 minutos, y el ensayo dura entre 2 y 15 minutos dependiendo del tipo de suelo.

El cálculo de las medidas de permeabilidad se realiza mediante la planilla ejemplificada en la Figura 3-12.

Figura 3-12: Ejemplo planilla para el cálculo de permeabilidad.

HOJA DE REGISTRO PERMEAMETRO DE GUELPH CALCULO DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA CON 1 CARGA						ARCADIS Infrastructure, environment, buildings	
Ensayo	:	LC-001	Coordenadas		N:	E:	
Fecha	:	13.08.09	Peso Especifico de Sólidos		G _s :	2,7	
Profesional	:	Mario Gajardo / Alvaro Elgueta	Humedad Inicial in Situ		ω :	15 %	
Reservorios Combinados Y = 35,22 cm ²			Densidad Seca In Situ		γ _d :	1,700 t/m ³	
Suelo limoso o arcilloso, con arena			Profundidad de la Perforación			47 cm	
α* = 0,04 cm ⁻¹							
Primer set de lecturas: H ₁ = 5 cm							
Nº de Lectura	Tiempo	Intervalo de Tiempo (min)	Nivel de Agua en Reservorio (cm)	Variación de Nivel de Agua (cm)	Tasa de Variación de Nivel de Agua (cm/min)		
1	2,00	0,50	6,80	1,20	2,40		
2	2,50	0,50	7,90	1,10	2,20		
3	3,00	0,50	9,00	1,10	2,20		
4	3,50	0,50	10,20	1,20	2,40		
5	4,00	0,50	11,40	1,20	2,40		
6	4,50	0,50	12,50	1,10	2,20		
7	5,00	0,50	13,50	1,00	2,00		
8	5,50	0,50	14,60	1,10	2,20		
9	6,00	0,50	15,90	1,30	2,60		
10	6,50	0,50	16,90	1,00	2,00		
11	7,00	0,50	17,90	1,00	2,00		
12	7,50	0,50	18,90	1,00	2,00		
R _{1,av}					2,00		
Segundo set de lecturas: H ₂ = 10 cm							
Nº de Lectura	Tiempo	Intervalo de Tiempo (min)	Nivel de Agua en Reservorio (cm)	Variación de Nivel de Agua (cm)	Tasa de Variación de Nivel de Agua (cm/min)		
1	2,50	0,50	12,00	1,20	2,40		
2	3,00	0,50	13,20	1,20	2,40		
3	3,50	0,50	14,20	1,00	2,00		
4	4,00	0,50	15,50	1,30	2,60		
5	4,50	0,50	16,50	1,00	2,00		
6	5,00	0,50	17,60	1,10	2,20		
7	5,50	0,50	18,60	1,00	2,00		
8	6,00	0,50	19,80	1,20	2,40		
9	6,50	0,50	20,90	1,10	2,20		
10	7,00	0,50	21,90	1,00	2,00		
11	7,50	0,50	23,00	1,10	2,20		
12	8,00	0,50	24,00	1,00	2,00		
R _{2,av}					2,00		
R _{av} Tasa de flujo en régimen permanente, obtenida cuando R es la misma al menos durante 3 intervalos de tiempo consecutivos							
R _{1,av} = 2,00 cm/min		= 3,33E-02 cm/s		R _{2,av} = 2,00 cm/min		= 3,33E-02 cm/s	
Conductividad Hidraulica de Campo	K _{f1}	= 0,00087 x 35,22 x 3,33E-02	= 1,0E-03 cm/s				
	K _{f2}	= 0,0006 x 35,22 x 3,33E-02	= 7,0E-04 cm/s				
Potencial de Flujo Matricial	φ _{m1}	= 0,02179 x 35,22 x 3,33E-02	= 2,6E-02 cm/s				
	φ _{m2}	= 0,01511 x 35,22 x 3,33E-02	= 1,8E-02 cm/s				
Parámetro Alfa (calculado)	α	= 8,48E-04 / 2,13E-02					
Variación de Humedad Volumétrica	Δθ	= 0,370 - 0,255					
Sortividad	S	= (2 x 0,11537 x 2,13E-02) ^{0,5}					
				K _{f1, av} = 8,5E-04 cm/s φ _{m, av} = 2,1E-02 cm ² /s α = 0,04 cm ⁻¹ Δθ = 0,115 cm ³ /cm ³ S = 7,0E-02 cm s ^{-1/2}			

4 Resultados

A continuación, se entregan los resultados por cada una de las componentes estudiadas y acorde a las diferentes líneas metodológicas antes entregadas.

4.1 Análisis de la evolución temporal de la vegetación: contraste de tendencia, estabilidad de los sistemas, distribución espacial y análisis de la formación vegetal

4.1.1 Contraste de tendencia y estabilidad de los sistemas

Los resultados del análisis de imágenes satelitales multiespectrales, tras el cálculo del NDVI, la segmentación y suma de las áreas con presencia de vegetación, se entregan en la Tabla 4-1. Cabe señalar que, en el proceso de segmentación, se realiza la discriminación de parte de la vegetación perimetral, la cual no cuenta con los patrones espaciales de formación vegetal y presenta bajos valores de NDVI, correspondiente a vegetación zonal no considerada como parte estable del humedal.

Tabla 4-1 Áreas con presencia de vegetación azonal

Año	Áreas con cobertura vegetal por sistema (ha)	
	Sallihuinca	San Nicolás
2007	4.74	12.76
2010	5.94	13.98
2013	5.65	15.89
2015	6.38	14.66

En la Figura 4-1 se muestran las series de tiempo obtenidas con el análisis de imágenes, junto con la línea de tendencia asociada a los datos.

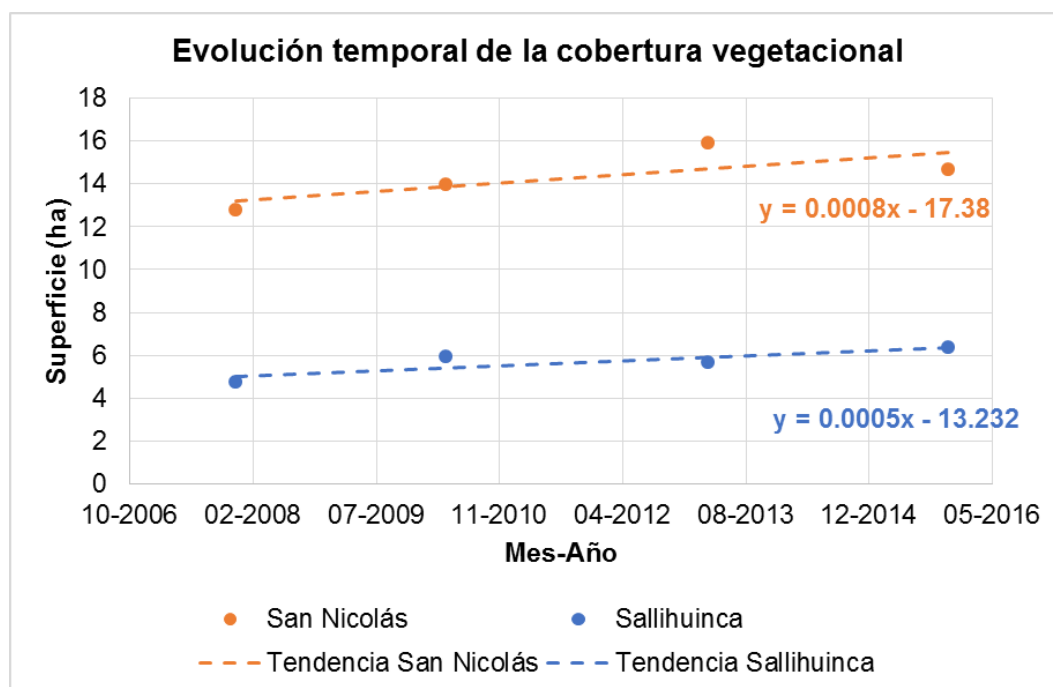


Figura 4-1 Series de tiempo con áreas con cobertura vegetal en sistemas de humedal San Nicolás y Sallihuinca. Se incluyen las tendencias determinadas para ambas series de tiempo.

En la Figura 4-1 se observa que el sistema Sallihuinca es el menor de los dos sistemas y presenta estabilidad en su tamaño, cuenta con un leve aumento de su área en el tiempo. En el caso de San Nicolás, el humedal cuenta con un tamaño mayor, de 2,5 a 3 veces el tamaño de Sallihuinca. Similar al primero, muestra un aumento del área, pero con una tendencia más marcada (cerca del doble del crecimiento).

4.1.2 Distribución espacial

A continuación se entrega el análisis espacial y de distribución del NDVI (Figura 4-2 a Figura 4-5), en términos de su valor como indicador de productividad y vigorosidad, ya que las áreas antes mostradas solamente dan cuenta de la presencia de vegetación.

Figura 4-2 Actividad fotosintética (NDVI) determinado en quebrada Sallihuinca en Diciembre/2007 y Abril/2010.

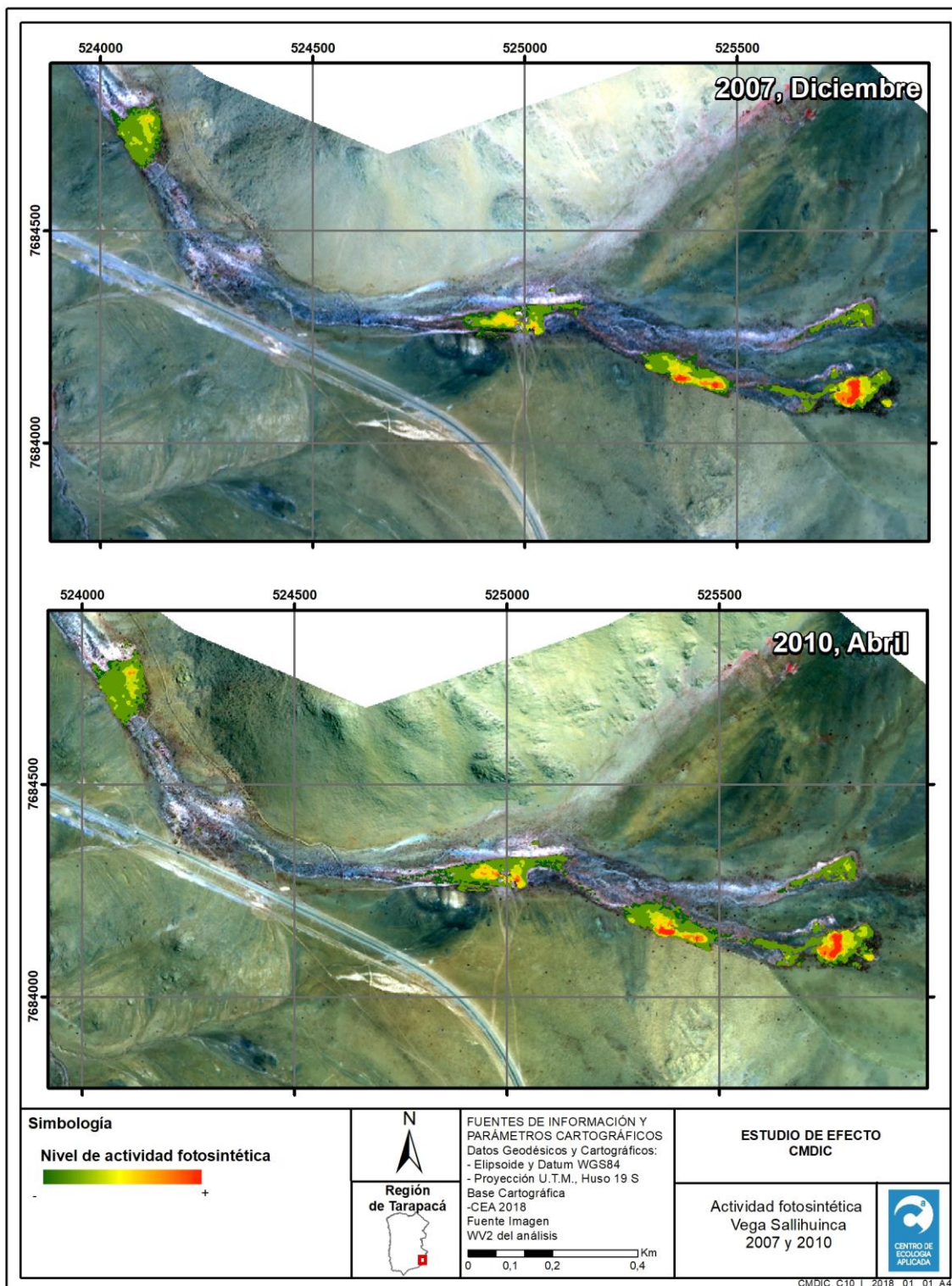


Figura 4-3 Actividad fotosintética (NDVI) determinado en quebrada Sallihuinca en Marzo/2013 y Noviembre/2015.

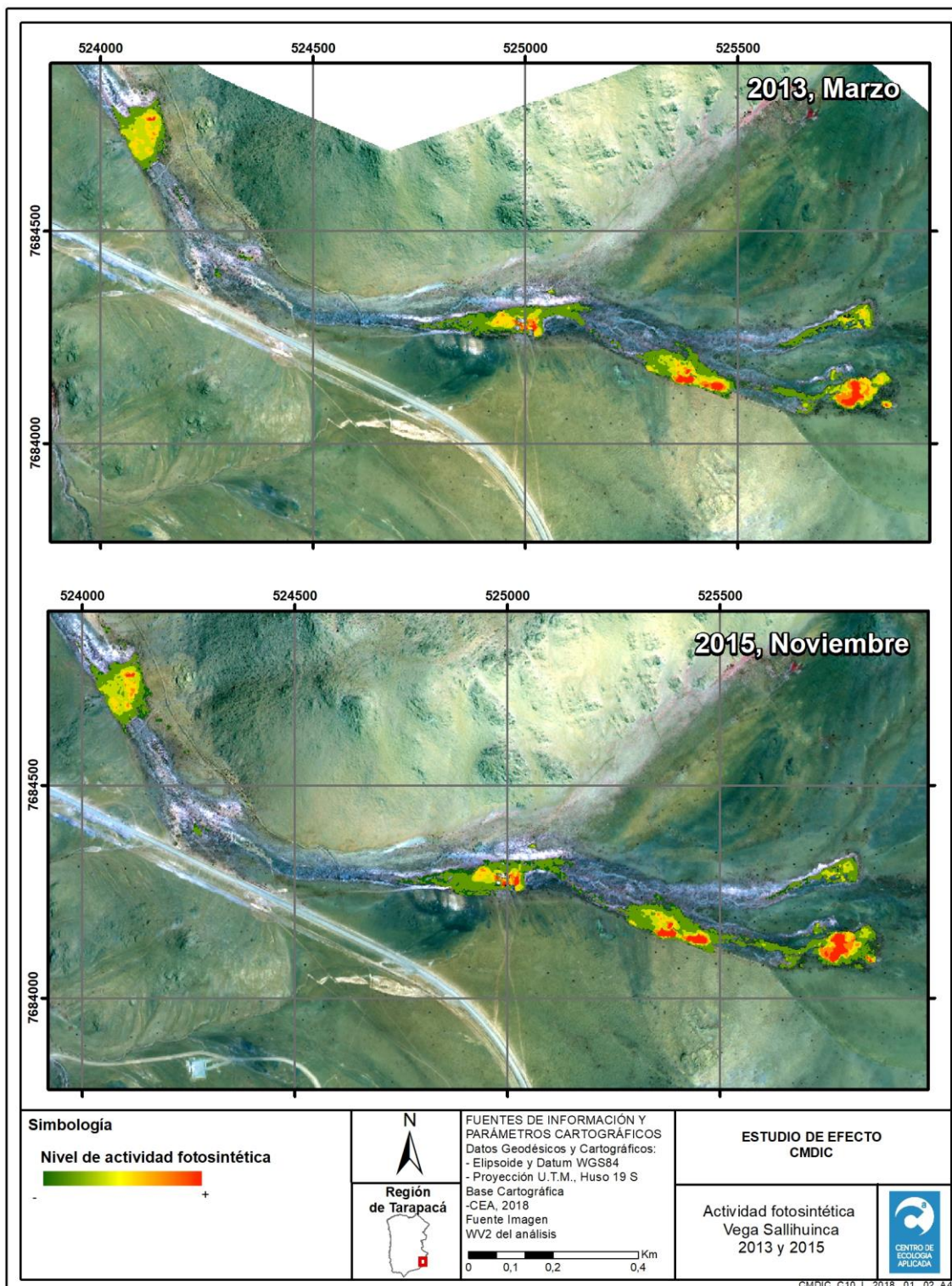


Figura 4-4 Actividad fotosintética (NDVI) determinado en quebrada San Nicolás en Diciembre/2007 y Abril/2010.

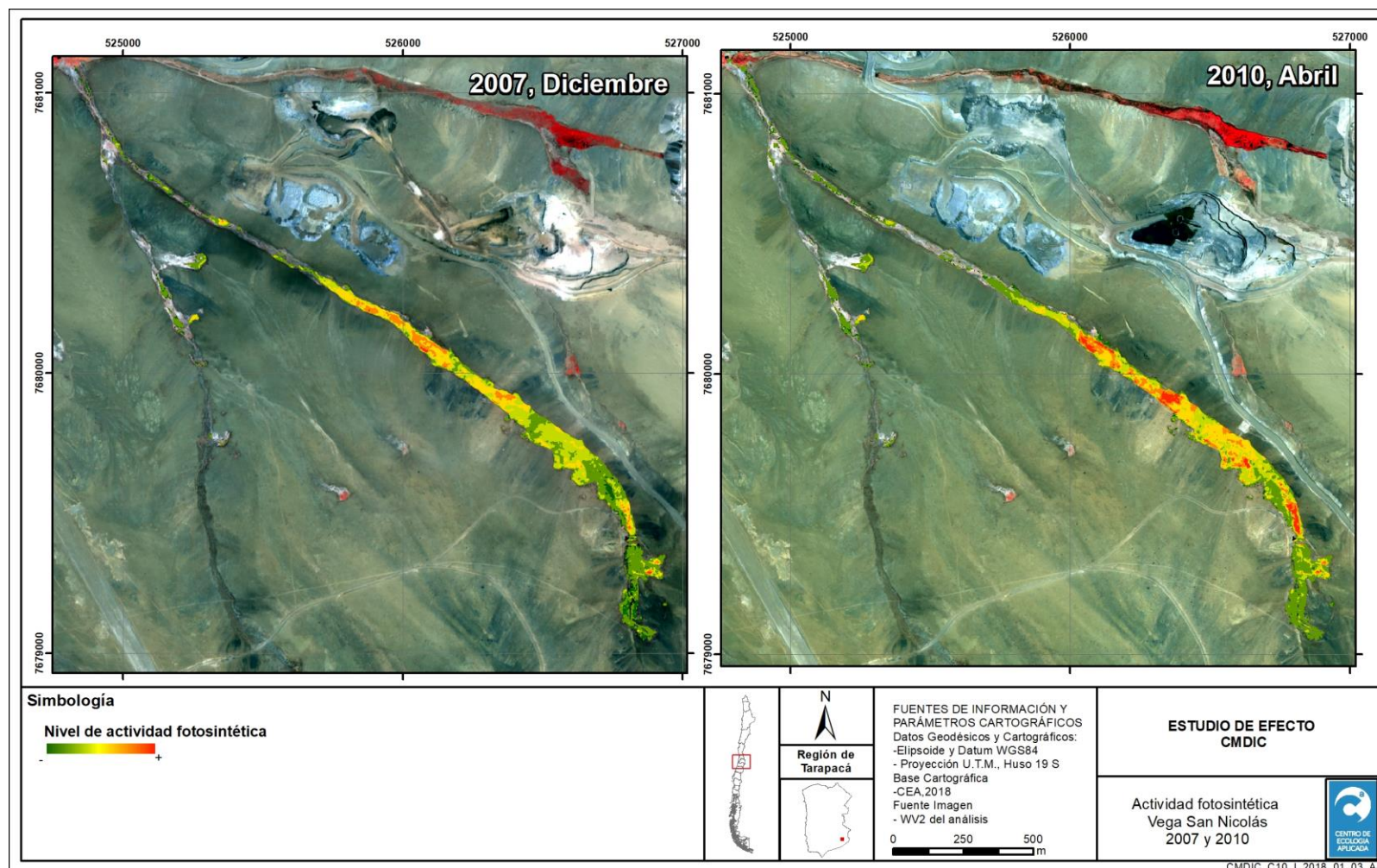
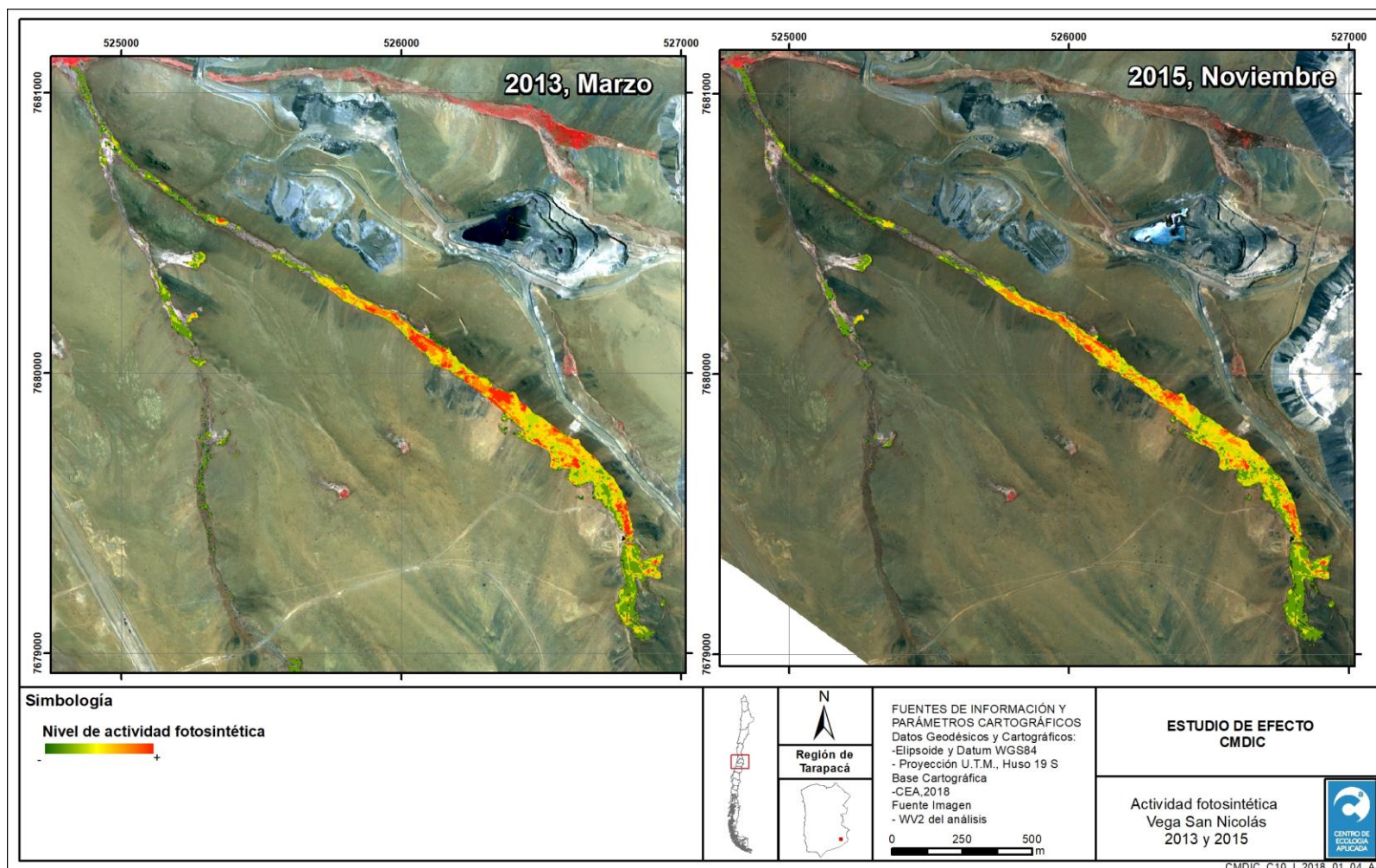


Figura 4-5 Actividad fotosintética (NDVI) determinado en quebrada San Nicolás en Marzo/2013 y Noviembre/2015.





En cuanto a la distribución de la vegetación en quebrada Sallihuinka (Figura 4-2 y Figura 4-3), se aprecia que ella cuenta con 5 zonas principales de desarrollo de la vegetación, de los cuales 4 muestran un núcleo bien definido, en términos de su actividad fotosintética (productividad). El desarrollo de estas zonas se muestra siempre limitado por los límites de la caja de la quebrada, y con desconexión casi completa entre ellas, sin una continuidad o conexión evidente entre los parches vegetacionales. En cuanto al cambio temporal, no se tiene evidencia de un cambio evidente en la condición ni distribución de la vegetación del sistema.

Por el contrario, la quebrada San Nicolás (Figura 4-4 y Figura 4-5) muestra ser una formación completamente continua, con excepción en la zona más baja y más estrecha, la que se encuentra contenida por la morfología de la caja de la quebrada. Así, el desarrollo de la vegetación está limitado por lo anterior, mostrando una alta productividad en todo su recorrido. En cuanto a la evolución temporal, el sistema muestra un aumento de la actividad fotosintética (productividad) en el tiempo.

Las diferencias existentes entre ambos sistemas radican, principalmente, en la existencia de la recarga en la quebrada San Nicolás, la cual genera una condición de disponibilidad hídrica permanente a lo largo del humedal; lo anterior, además permite que gran parte de la vegetación cuente con una condición de producción (actividad fotosintética) alta.

4.1.3 Análisis de la formación vegetacional

El sistema vegetacional presente en quebrada San Nicolás ha sido monitoreado históricamente, contando con información de cobertura y riqueza desde el año 2004 en adelante. Este monitoreo es realizado en dos puntos de control, el denominado San Nicolás 1 que se ubica en el centro de la caja de la quebrada; y un segundo punto, denominada San Nicolás 2, ubicado en la zona de borde o perimetral de la vegetación. La información histórica se entrega en la Tabla 4-2 y en las Figura 4-6 y Figura 4-7.



Tabla 4-2 Compilado del monitoreo histórico en quebrada San Nicolás en mismo punto. Se entregan valores de cobertura de la vegetación relativa al suelo, y valores de la riqueza evidenciada.

Año	Mes	Cobertura (%)	Riqueza (N° Especies)
2004	Oct	80	7
2005	Oct	70	7
2006	Oct	75	7
2007	Ene	90	3
	Ago	90	3
2008	Feb	90	3
	Ago	95	3
2009	Feb	90	3
	Ago	100	3
2010	Ene	95	4
	Ago	75	8
2011	Ene	65	1
	Ago	80	3
2012	Ene	70	3
	Ago	90	7
2013	Mar	90	5
	Ago	90	4
2014	Ene	90	5
	Ago	80	4
2015	Feb	80	4
	Ago	100	3
2016	Ene	90	5
	Ago	100	4
2017	Feb	80	6
	Ago	65	2

Figura 4-6 Actividad fotosintética (NDVI) determinado en quebrada San Nicolás en Diciembre/2007 y Abril/2010.

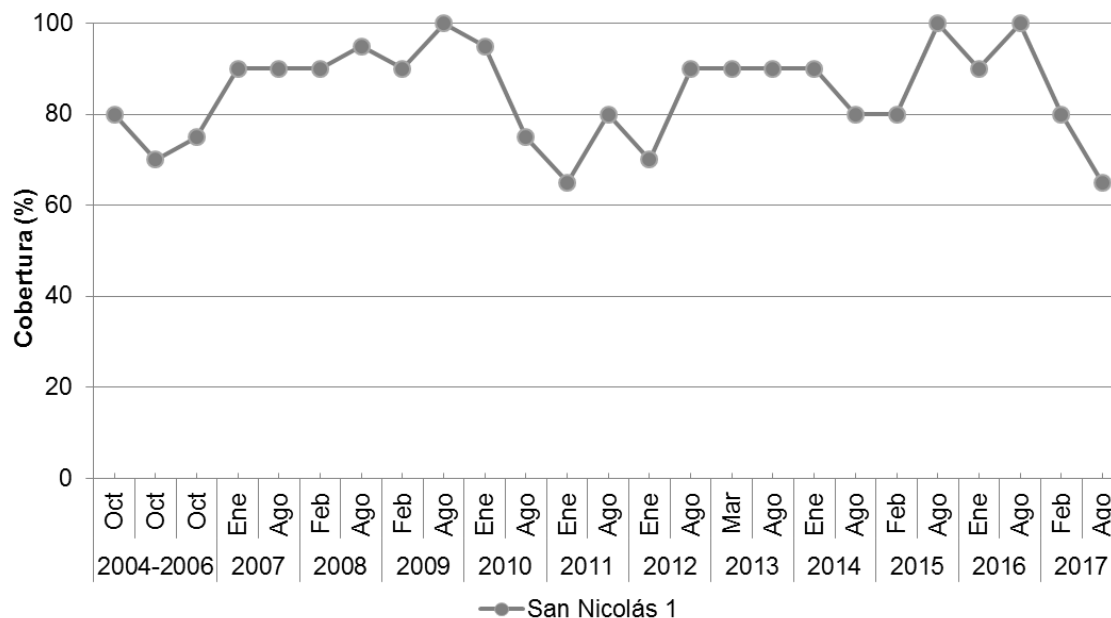
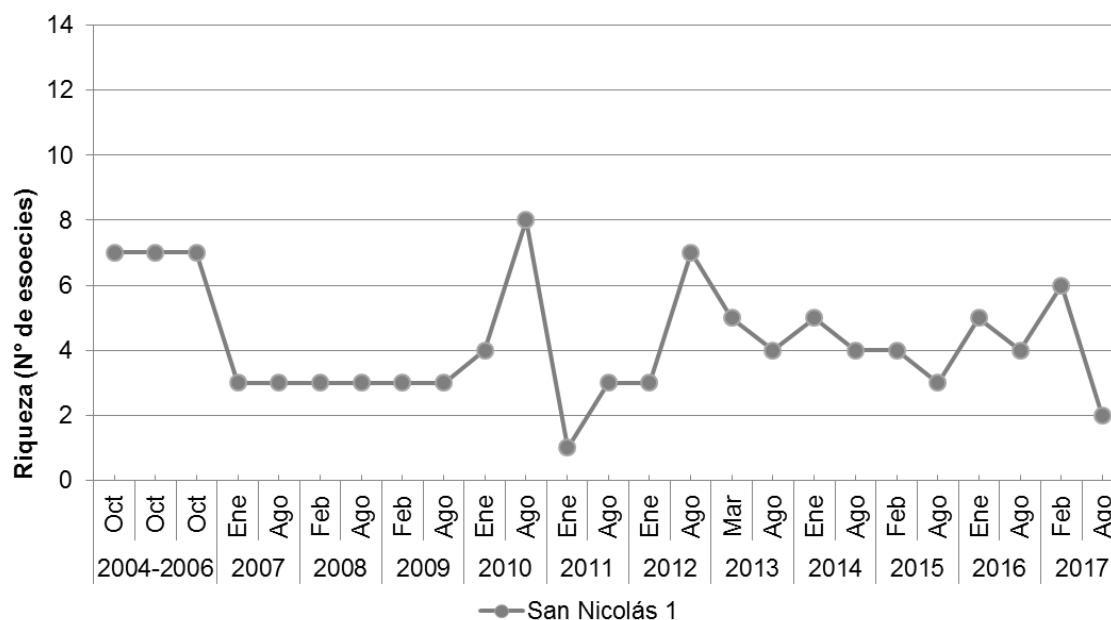


Figura 4-7 Actividad fotosintética (NDVI) determinado en quebrada San Nicolás en Diciembre/2007 y Abril/2010.



El monitoreo histórico muestra que el sistema no ha presentado cambios en su cobertura media ni en su composición (riqueza), mostrando condiciones constantes en ambas variables. Así, el sistema no muestra variaciones estacionales ni interanuales, mostrando que la recarga permite una condición óptima permanente debida a la recarga constante en el sistema.

Así, se desprende que la existencia de la recarga permite al sistema mantener sus características intra-anualmente, sin contar con períodos de stress y baja productividad.

4.2 Determinación de la demanda hídrica de los sistemas

Los resultados para las diferentes componentes del balance hídrico, y para ambos sistemas analizados, se entregan a continuación.

4.2.1 Mediciones de la demanda hídrica para la mantención del nivel de aguas subterráneas (flujo superficial)

Los resultados de las mediciones realizadas en terreno se entregan en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Resultados de las mediciones de terreno del flujo superficial.

Sistema	Puntos	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Resumen Caudales [l/s]			
				may-16	mar-17	jun-17	sep-17
San Nicolás	AFO-SC1	7681112	524780	(*)	19.53 ± 1.52	(**)	0.01 ± 0.00
	AFO-SC2	7679384	526798	11.15 ± 0.72	9.45 ± 0.68	(**)	0.84 ± 0.18
	AFO-SC3	7681096	524779	17.90 ± 1.19	(***)	(***)	(***)
Sallihuinca	AFO-SA1	Sin punto aforado		(*)	(*)	(*)	(*)

(*) No hay caudal para realizar aforo (congelado o sin escurrimiento)

(**) Sin posibilidad de acceso

(***) Punto de campaña de mayo de 2016, fue reubicado para las siguientes campañas.

Cabe señalar que, dada la variabilidad inter-anual de los caudales superficiales, se determina un valor único referencial por cada sistema. Estos valores son los entregados en la

Tabla 4-4 Demanda hídrica por flujo superficial.

Sistema	Caudal Superficial [L/s]
	Q (L/s)
San Nicolás	9.40
Sallihuinca	0.00

4.2.2 Mediciones de la demanda hídrica para la mantención del nivel de aguas subterráneas (flujo subsuperficial)

La demanda hídrica para la mantención del nivel de aguas subterráneas existente en ambos sistemas estudiados, fue obtenida con los datos del estudio “Mediciones de terreno en quebradas y estimación caudal pasante” (Arcadis, 2017), en donde se realiza la estimación del flujo pasante local por medio de la aplicación de la ley de Darcy. Así, en el estudio se realizaron mediciones de campo de la permeabilidad del suelo y el



gradiente hidráulico, junto con la realización de una estimación del área de flujo subsuperficial. Con los parámetros anteriores, se obtuvieron los flujos pasantes en cada quebrada. Los valores determinados para cada sector se entregan en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Caudales de demanda subsuperficial determinados por sistema analizado.

Sistema	Caudal Subsuperficial	
	Q (m ³ /día)	Q (L/s)
San Nicolás	4.70	0.05
Sallihuinca	0.71	0.01

4.2.3 Mediciones de la demanda hídrica para la mantención de la vegetación (evapotranspiración)

La demanda hídrica para la mantención de la vegetación fue obtenida mediante la estimación de la tasa de evapotranspiración del total de vegetación presente en cada humedal. Estas tasas fueron estimadas como una serie de tiempo de evapotranspiración media a nivel mensual. Los resultados obtenidos de las mediciones de campo se entregan en la Tabla 4-6, y los resultados obtenidos del análisis y estimación de la serie de tiempo media de evapotranspiración a nivel mensual se entregan en la Tabla 4-8.

Tabla 4-6: Tasas de evapotranspiración diaria obtenidas de las mediciones de terreno realizadas en campañas estacionales.

Sistema	Evapotranspiración diaria [mm]			
	Otoño 2016	Verano 2017	Otoño 2017	Primavera 2017
San Nicolás	0,839	0,609	S/M	3,380
Sallihuinca	0,858	2,435	1,292	1,284

S/M: sin medición

Cabe señalar que, para la determinación de un volumen total de evapotranspiración por cada sistema, además de las tasas netas de evapotranspiración determinadas con la información de terreno, se utilizaron las áreas por sector que cuentan con cobertura vegetal. Las áreas utilizadas en la determinación por cada sistema, se entregan en la Tabla 4-7.

**Tabla 4-7 Superficie de sistema azonal determinado por sistema analizado.**

Sistema	Superficie
	[ha]
San Nicolás	15.1
Sallihuinca	4.6

Determinada el área de los sistemas y las tasas de evapotranspiración diaria (en mm), se realiza la estimación de las curvas anuales ajustadas de evapotranspiración, las cuales se muestran en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8 Caudales de demanda por parte de la vegetación determinados por cada sistema analizado.

Sector	ETc diaria promedio según mes del año [L/s]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
San Nicolás	4.37	3.91	3.27	2.48	1.82	1.43	1.45	1.85	2.55	3.32	4.00	4.39
Sallihuinca	1.14	1.03	0.86	0.65	0.48	0.38	0.38	0.48	0.67	0.87	1.05	1.15

4.2.4 Integración de las componentes de la demanda hídrica

Al integrar las 3 componentes de la demanda hídrica, es posible obtener las series de tiempo de demanda total de cada sistema. Estos valores de demanda obtenidos son los entregados en Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Caudales de demanda total mensual determinados por cada sistema analizado.

Sector	Demanda hídrica por sistema por mes (L/s)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Valor Máximo Anual (L/s)
San Nicolás	13.82	13.36	12.72	11.93	11.27	10.88	10.90	11.30	12.00	12.77	13.45	13.84	13.84
Sallihuinca	1.15	1.04	0.87	0.66	0.49	0.39	0.39	0.49	0.68	0.88	1.06	1.16	1.16

Los caudales demandados corresponden a los necesarios para la mantención de los sistemas en condiciones similares a las actuales. Así, mientras los sistemas no sean afectados y cuenten con los aportes naturales de agua desde el acuífero, los planes de mejora de la productividad, expresada como aumento de la cobertura o productividad intra-sistema, deberán considerar la adición de caudales de recarga que estén acordes a las demandas evapotranspirativas de la vegetación, ya sea esta la existente o nueva vegetación a desarrollarse.



Es por lo anterior que se debe considerar lo siguiente:

- En un sistema sin intervención de la recarga natural, se debe considerar la demanda evapotranspirativa proporcional de la vegetación ahí presente para determinar la cantidad de agua necesaria para el incremento de un área específica. Como consecuencia natural se tendrá una mejora en los indicadores de productividad de las zonas ya existentes, las que servirán como núcleos de desarrollo para la nueva vegetación.
- La aplicación de la recarga debe ser diseñada según el propósito buscado, como por ejemplo, para la extensión de una formación vegetacional hacia los márgenes de la caja de la quebrada, se hará necesaria la distribución de la aguas en pequeños canales perimetrales que distribuyan el agua y entreguen humedad a esas zonas. Para el caso de la mejora de parches ya existentes, la recarga deberá ser realizada en la cabecera y mediante drenes, que permitan recargar en parte el flujo subsuperficial, y asumiendo que los excesos aflorarán en superficie, generando probables nuevas áreas de desarrollo vegetacional.
- Se evaluarán acciones adicionales a aplicar en sectores con condiciones degradadas de calidad, en la medida que sea autosustentables en el tiempo.



5 Conclusión

En el contexto del análisis de la evolución temporal de la vegetación, se tiene que el sistema Sallihuinka corresponde a un sistema natural no intervenido, el cual cuenta con características de bofedal altoandino y se presenta en parches separados; los cuales han mostrado una condición estable con un leve aumento de su superficie. Así, la estabilidad del sistema en el tiempo, en términos de su tamaño y ubicación, indican que no se han desarrollado efectos o alteraciones evidenciables en los sistemas vegetacionales azonales ubicados en las inmediaciones de CMDIC.

El sistema San Nicolás muestra un desarrollo amplio y continuo, y con alta actividad (productividad) y vigorosidad de la vegetación. Esto se debe a la existencia de escorrentía superficial y subsuperficial permanente, ambas asociadas a una recarga en la cabecera del sistema, la cual permite el máximo desarrollo del humedal; teniéndose así que la vegetación es capaz de utilizar todo el espacio disponible (base del cajón de la quebrada). Junto con lo anterior, la recarga permanente conlleva una condición de vegetación que es permanente durante el año, sin contar con zonas que tengan intermitencia (en su producción y/o condición) intra-anualmente.

El análisis del monitoreo histórico del sistema azonal en la quebrada de San Nicolás, muestra que el sistema no ha presentado cambios en su cobertura media ni en su composición (riqueza), mostrando condiciones de baja variabilidad en ambas variables. Así, el sistema no muestra variaciones estacionales ni interanuales, indicando que la recarga permite una expresión areal máxima, manteniendo sus características intra-anualmente y sin contar con períodos de stress y baja productividad. Estos sistemas de bofedales en quebradas se caracterizan por tener una baja riqueza de especies de plantas vasculares. Al tener un suministro de agua no limitante, la productividad presenta pocas variaciones espaciales, aunque debe presentar un ciclo estacional como consecuencia de las características climáticas.