

Estimación de evapotranspiración potencial, ETP, a partir de imágenes NOAAVHRR en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins¹

Marcela Sánchez², Luis Carvacho²

²Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Email: mism@puc.cl; icarvach@puc.cl

RESUMEN

A partir del análisis de regresión múltiple entre valores de evapotranspiración potencial, ETP, estimados con el método empírico de Penman (1948) en 26 estaciones meteorológicas, y variables derivadas de imágenes NOAAVHRR -basadas fundamentalmente sobre la temperatura de superficie y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI- se generan modelos que permiten estimar la ETP en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins en el período comprendido entre septiembre de 1998 y diciembre de 2000. Los modelos fueron evaluados satisfactoriamente en las estaciones meteorológicas utilizadas. De acuerdo con estos resultados es posible afirmar la utilidad de la percepción remota en la determinación de la ETP a escala regional.

Palabras clave: evapotranspiración potencial, percepción remota, interpolación espacial.

ABSTRACT

Using regression analysis between potential evapotranspiration values, ETP, obtained with Penman's empirical method (1948) in 26 meteorological observatories, and remote sensing derived data from NOAA AVHRR images essentially surface temperature and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) models for estimating ETP in VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins are generated for the period between september 1998 and december 2000. These models were satisfactorily evaluated in the meteorological observatories used. According these results, the utility of remote sensing in determination of ETP at regional scale is confirmed.

Key words: potential evapotranspiration, remote sensing, spatial interpolation.

La evapotranspiración, ET, en sus diferentes acepciones es un parámetro clave en el balance de energía del sistema TierraAtmósfera, en la detección de estrés hídrico vegetal, en la predicción del rendimiento de los cultivos, en el cálculo del balance hídrico y en la caracterización climática de las distintas zonas, por nombrar algunos aspectos. Por ello es de interés para múltiples disciplinas. Sin embargo, dada la complejidad del proceso y la diversidad de factores de los que depende, la magnitud e intensidad del fenómeno es difícil de determinar. Ello está demostrado en la profusión y diversidad de los métodos o modelos que se han elaborado, y siguen elaborando aún en la actualidad, para su determinación.

Los métodos hoy en uso para determinar la ET pueden dividirse en los que utilizan información recolectada en la superficie y aquellos que emplean información obtenida desde el espacio por percepción remota. Los primeros pueden, a su vez, clasificarse en directos, teóricos y empíricos, siendo los primeros aquellos que calculan la ET a través del control de las entradas y salidas de agua en el suelo, mientras que los teóricos se generan fundamentalmente en la consideración de la evapotranspiración como elemento que forma parte del balance de energía y su papel en la transferencia de masa de vapor de agua entre la Tierra y la atmósfera; por último, los empíricos, los métodos más utilizados en los estudios geográficos y medioambientales, son, en general, simplificaciones de los métodos anteriores que, a través de correlaciones entre medidas obtenidas por aquellos y medidas de una o más variables climáticas o meteorológicas, han permitido derivar fórmulas empíricas para estimar la capacidad evaporativa de un ambiente determinado, por ello también se denominan métodos climatológicos (Sánchez, 2000). Dentro de los métodos que utilizan datos satelitales se pueden distinguir dos tipos de modelos diferentes; aquellos, a partir de los cuales es posible obtener todos los parámetros necesarios para estimar la ET, y otros que requieren el uso de datos satelitales en combinación con datos recolectados en tierra a través de los observatorios meteorológicos, por ejemplo.

Batra (2005) compara estimaciones de ET obtenidas solamente con datos espaciales, en particular AVHRR y MODIS, en los Grandes Valles estadounidenses, empleando para su derivación una variación del método empírico propuesto por Priestley y Taylor en 1972. El mismo modelo de Priestley y Taylor también ha sido sugerido y utilizado para obtener la ET empleando, conjuntamente, datos satelitales y terrestres (Seguin et al., 1991). Esta última forma de modelos ha sido muy utilizada en las últimas décadas y en ellos los datos térmicos son fundamentales, pues colaboran en la solución de los términos de la ecuación del balance general³, que ha derivado, más tarde, en el denominado método residual⁴, el cual constituye una de las aproximaciones que más ampliamente han sido utilizadas en la determinación de la evapotranspiración instantánea y diaria, tal como señalaba Choudhury ya en 1994. Patel et al. (2006) utilizan una variación de la ecuación del balance general y emplean en sus estimaciones datos MODIS en combinación con algunos datos recogidos en terreno.

El método residual, señalado en el párrafo anterior ha sido modificado por R. D. Jackson y colaboradores (1977) para derivar en la denominada, por algunos autores, ecuación simplificada⁵; en esta, la temperatura superficial también es un elemento importante al constituirse en el principal indicador de la distribución de la energía disponible en la superficie de la Tierra. Esta ecuación sigue siendo revisada y modificada para alcanzar una mayor operatividad en su uso. En este sentido destacan los modelos basados en ella y aplicados por Seguin et al. (1989, 1991 y 1994), Caselles et al. (1992, 1993 y 1998), Delegido y Caselles (1993), Seguin (1993), Sánchez y Chuvieco (2000), entre otros, para determinar la ET en sus diferentes

manifestaciones. En muchos de estos modelos la ET ha sido frecuentemente derivada a partir de la diferencia de temperaturas de superficie y del aire (TSTA) y requieren, por tanto, para su generación medidas de temperatura registradas en estaciones meteorológicas convencionales, aunque también hay estudios que han derivado la temperatura del aire a partir de medidas realizadas por los sensores remotos (Caselles et al., 1992).

Por otro lado, se encuentran los modelos fundamentados en las relaciones entre ET y algunas características de la vegetación como las expresadas a través de ciertos índices, especialmente el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), aunque en la actualidad con la incorporación de nuevas plataformas y sensores se están generando otros índices de vegetación o mejorando los existentes (Nagler et al., 2005). La relación entre ET y la vegetación se produce, tal como señalan Yang et al. (1997), debido a que ambos parámetros son afectados por elementos meteorológicos, entre ellos, la temperatura, la radiación solar y el déficit de presión de vapor. Los estudios de Wiegand y Richardson (1990), Cihlar et al. (1991), Yang et al. (1997), Mora e Iverson (1998), entre otros, han establecido muy buenas correlaciones entre datos de NDVI y de ET, tanto ETP⁶ como ETR⁷. Estos modelos, normalmente combinan datos satelitales y medidas de algunos parámetros tomados en tierra.

Aunque algunos estudios, como el de Di Bella et al. (2000) en la pampa argentina, han conseguido buenas estimaciones de ETR a partir de medidas conjuntas de NDVI y TS, la relación más ampliamente utilizada para obtener ET es aquella que vincula la diferencia de temperatura de superficie y del aire (TSTA), índices de vegetación y ET. Esta relación se basa en el hecho de que normalmente en un punto cualquiera la TS es mayor a la TA, no obstante, esta diferencia tiende a reducirse si en la cubierta se produce flujo de calor latente o ET y el consecuente efecto refrigerante, dependiente a su vez del contenido de agua de la cubierta. Según esto, la ET se puede asociar con el estrés hídrico vegetal, lo que ha favorecido la generación de métodos para la estimación del estrés a partir de información satelital, en especial el Water Deficit Index (WDI) elaborado por Moran et al. (1994) que se relaciona también con el Crop Water Stress Index (CWSI) elaborado antes por R. D. Jackson et al. (1981). Este índice se refiere también al cociente entre evapotranspiración real y evapotranspiración potencial (ETR/ETP), con lo cual se evidencia la estrecha relación entre ET y estrés hídrico vegetal señalado. Por último, debe destacarse el hecho de que conociendo el valor del WDI y la ETP con algún método convencional es posible obtener la ETR, parámetro muy difícil de determinar con precisión en superficies extensas con los métodos convencionales. Esto último constituye un gran aporte de la teledetección al estudio de la ET.

Aprovechando las relaciones ya establecidas entre ET y variables satelitales, el trabajo que se presenta intenta evaluar dichas relaciones y su utilidad en la estimación de ET a escala regional, específicamente la evapotranspiración potencial, ETP, en la VI Región del Libertador General Bernardo O´Higgins. Las imágenes satelitales utilizadas son las proporcionadas por el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), embarcado a bordo de los satélites de la serie NOAA.

Área y período de estudio

El área de estudio corresponde a la VI Región del Libertador General Bernardo O´Higgins la cual, con su superficie de 16.365 km² y los contrastes espaciales que generan elementos como el clima y el relieve, constituye un área adecuada para realizar un estudio de estas características. Dentro del clima templado general, el dominante en la Región es del tipo

mediterráneo con lluvias de invierno, temperaturas moderadas y estación seca prolongada. Sin embargo, en la alta cordillera es posible identificar un clima frío provocado fundamentalmente por la altura. En cuanto al relieve, el territorio regional está constituido por cuatro grandes unidades: las planicies litorales de gran desarrollo en la Región, la cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia y la cordillera de los Andes. Ambas cordilleras se desarrollan enérgicamente, aproximándose en algunos sectores dando lugar a la denominada Cuenca de Rancagua.

El período de estudio corresponde a los meses comprendidos entre septiembre de 1998 y diciembre de 2000. La longitud del período seleccionado permite contar con una variabilidad temporal del fenómeno que favorece el contraste de resultados.

Metodología

Para cumplir con el objetivo general es necesario, por una parte, determinar la ETP a partir de datos meteorológicos con un método de cierta precisión y generar, por otro lado, la información satelital teóricamente asociada al fenómeno. Luego se relacionan los dos tipos de datos para evaluar las asociaciones existentes entre ambos y en función de ello generar modelos de estimación que permitan dar una imagen de fidelidad razonable de la ETP a escala regional. La estimación de la ETP se realizó a través del modelo empírico, basado en la ecuación de combinación del balance de energía y de la transferencia turbulenta del vapor de agua, formulado en 1948 por Howard Latimer Penman. Este método ha sido ampliamente difundido y utilizado en el mundo y también en Chile (Sánchez, 2001). Los datos necesarios para su aplicación corresponden a los proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile para 26 estaciones meteorológicas distribuidas fundamentalmente en la VI Región, además de algunas localizadas en la V, VII y Región Metropolitana. Se obtuvieron valores promedio para las 84 décadas, o periodos de diez días, comprendidas en el lapso estudiado. La fórmula de Penman, tomada de Merlet y Santibáñez (1989), y de CNRCIREN (1997) se expresa como:

$$ETP = 0,017 \times R_n \times W + (1 - W) \times 0,265 \times (1 + 0,0062 \times U_2) \times (e_a - e_d)$$

donde	:	
ETP	:	evapotranspiración potencial, expresada en mm/día
R _n	:	radiación neta, expresada en cal/cm ² /día
W	:	(0,414 + 0,0125 × T _m)
T _m	:	temperatura media del aire, expresada en °C
U ₂	:	recorrido del viento, expresado en km/día
(e _a - e _d)	:	déficit de presión de vapor, expresado en mb

Dado que las series de datos básicos de las estaciones no estaban disponibles en su totalidad se completó parte de las cifras faltantes a través de ecuaciones de regresión

obtenidas considerando los métodos de Turc, JensenHaise y SamaniHargreaves, de menos requerimientos de datos de entrada. Para dar una imagen continua del fenómeno en la Región, con la cual contrastar más tarde las obtenidas con la ayuda de las imágenes, estos datos puntuales fueron interpolados con el método de kriging. Se escogió el tipo de variograma, forma y ángulo de la elipse de búsqueda adecuados al área de estudio, según el conocimiento que se tiene de ella.

Por su parte, desde las imágenes NOAAVHRR, profusamente utilizadas en estudios a escalas globales y regionales, dada su resolución espacial, espectral y temporal, se obtiene información sobre diversos aspectos de la superficie que en estudios previos se han asociado al fenómeno. De esta manera, a partir de información derivada directamente por el sensor (albedo y temperatura de brillo) se obtienen dos nuevas variables: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que relaciona las bandas 1 y 2 de la imagen, y que representa el vigor vegetal en el área de estudio según los valores captados por el sensor, y la Temperatura de superficie (TS) que se obtiene utilizando el algoritmo de ventana dividida (split window) formulado por Coll et al. (1994), adecuado para regiones mediterráneas. La TS obtenida se encuentra también corregida por emisividad, es decir, considera el tipo de cubierta que se encuentra emitiendo energía. Así, se obtuvieron cubiertas de NDVI y TS para toda el área de estudio derivadas de cada imagen disponible en el lapso que abarca la investigación. A partir de las capas de NDVI, se calculó el máximo y el mínimo valor de este para cada pixel del área de estudio, información con la que a su vez se obtuvo una tercera capa o variable, el verdor relativo, que indica el estado de vigor vegetal de un pixel con relación al mínimo y al máximo históricos observados en el mismo durante el lapso del estudio.

Teniendo como base las capas de NDVI y TS obtenidas en las fases anteriores, se generó una ventana de 3x3 pixeles sobre la localización de cada una de las estaciones meteorológicas utilizadas en la investigación, teniendo como pixel central justamente aquel que corresponde a la posición del observatorio. Estas ventanas se usaron para extraer los valores de las variables de las dos capas señaladas. Con estos datos se generó un conjunto de archivos con información X, Y, Z, donde X e Y representan las coordenadas de cada punto (UTM) y Z el valor de NDVI o TS, respectivamente. Los valores Z se obtuvieron mediante el promedio de los valores de los nueve pixeles individuales extraídos por la ventana de trabajo.

Una vez obtenida la información meteorológica y satelital básica se realizaron análisis de correlación entre ambos tipos de datos para determinar las variables satelitales que mejor se asocian con la ETP. Se realizó un análisis desde el punto de vista espacial que intentaba determinar si la localización de las estaciones meteorológicas tiene algún efecto sobre las relaciones que se producen entre la ETP y la información satelital; también se realizó un análisis de correlación temporal para observar si la evolución temporal de la ETP se asocia con los cambios experimentados en las variables de satélite.

Por último, se buscaron modelos que permitieran estimar la ETP a partir de las imágenes de satélite en cualquier momento dentro del período considerado. Estos modelos corresponden a ecuaciones de regresión múltiple obtenidos tras la consideración de toda la variación espacial y temporal de los datos de las 26 estaciones en el período estudiado. Los modelos encontrados fueron aplicados a los datos correspondientes a determinadas décadas y los resultados fueron evaluados para valorar la calidad del modelo.

Resultados

Se aplicó el método de Penman sobre los datos meteorológicos recolectados y se obtuvieron las estimaciones para el período y en las estaciones consideradas. Los resultados muestran el comportamiento sinusoidal de la ETP a lo largo del año, presentándose los mayores valores entre los meses de noviembre y febrero, y los mínimos entre mayo y agosto. Esta situación se mantiene en todas las estaciones consideradas, aunque se presentan diferencias entre las costeras y de interior. Con los datos de las décadas seleccionadas, las mismas que se utilizaron en las otras fases del estudio, se construyeron mapas de ETP para la VI Región mediante su interpolación espacial con el método de kriging.

Las variables generadas a partir de las imágenes muestran un comportamiento estacional marcado. Se aprecian zonas que experimentan notables cambios a lo largo de los meses estudiados y otras en que las variaciones son más reducidas. La Depresión Intermedia, representada en gran parte de la Región por la Cuenca de Rancagua y cuencas intermontanas con sus áreas de regadío exhiben los cambios más drásticos en el índice NDVI; mientras, algunas zonas de la cordillera de la Costa son las que muestran contrastes muy marcados en la TS.

En cuanto a los análisis de correlación entre ETP, y las variables espectrales y derivadas se comprobaron ciertas relaciones que se esperaban. Las que se detectan desde el punto de vista temporal son más intensas y persistentes que las espaciales. La TS es la variable mejor asociada con la ETP; las correlaciones entre las variables son significativas en todas las estaciones, en su conjunto y separadas por ambientes climáticos ([Cuadro Nº 1](#)). Esta separación se realizó considerando un modelo digital de elevaciones según las formas de relieves predominantes, y su exposición y proximidad a la influencia oceánica.

Cuadro Nº 1

COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LA ETP ESTIMADA CON
LOS DATOS METEOROLÓGICOS Y LAS VARIABLES GENERADAS Y
DERIVADAS A PARTIR DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE Y DATOS
METEOROLÓGICOS EN TODO EL PERÍODO DE ESTUDIO.
COEFICIENTES PARA TODAS LAS ESTACIONES Y SEPARADAS EN
ESTACIONES DE COSTA O CON INFLUENCIA OCEÁNICA Y
ESTACIONES DE INTERIOR

Variables	Estaciones meteorológicas			
	todas	costeras	de influencia oceánica	de interior
TS	0,714*	0,658	0,758	0,718
NDVI	0,441	0,357	0,166	0,594
Verdor	0,472	0,366	0,175	0,631
NDVI/TS	0,058	0,090	-0,236	0,261
TS-TAm	0,338	0,189	0,468	0,292
TS-TAmx	0,144	0,015	0,285	0,110

*: En negrilla se indican los valores estadísticamente significativos.
 TS: Temperatura de superficie. NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index).
 Verdor: Verdor relativo. Relación entre el valor del NDVI de un pixel en un día o período determinado y los valores máximos y mínimos de NDVI para ese pixel en el registro histórico disponible. NDVI/TS: Cuociente entre el NDVI y la TS. TSTAm: Diferencia entre la temperatura de superficie y la temperatura media del aire. TSTAmx: Diferencia entre la temperatura de superficie y la temperatura del aire.

Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista temporal, al observar en el [Cuadro Nº 2](#) los coeficientes de correlación de los análisis realizados para todo el período en cada estación, se aprecia que la TS resulta ser significativa en las 26 estaciones; le sigue la variable NDVI/TS en 14 estaciones, y el NDVI en 10 estaciones y el Verdor relativo en 11. Con estos resultados se establece la existencia de relaciones entre la ETP y los datos satelitales.

Cuadro Nº 2

COEFICIENTES DE CORRELACIÓN TEMPORAL ENTRE LA ETP Y LAS VARIABLES SATELITALES Y DERIVADAS EN CADA UNA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS

Estación	Variables satelitales y derivadas					
	TS	NDVI	NDVI/TS	Verdor	TS-TAm	TS-TAmx
Alhué	0,522	-0,093	-0,383	-0,093	0,213	-0,060
Hidango	0,658	-0,272	-0,497	-0,272	0,359	0,224
La Rosa	0,423	0,301	-0,043	0,301	0,173	-0,024
Longovilo	0,592	-0,280	-0,493	-0,280	0,339	0,036
Marchigüe	0,774	-0,536	-0,739	-0,536	0,547	0,466
Nilahue	0,715	-0,516	-0,687	-0,516	0,341	0,244
Paredones	0,628	-0,209	-0,588	-0,210	0,331	0,263
Pichilemu	0,723	-0,057	-0,498	-0,057	0,309	0,116
San Vicente	0,537	0,176	-0,211	0,176	0,172	0,074
Tanumé	0,558	0,299	0,026	0,299	0,165	0,031
Colchagua	0,628	-0,088	-0,578	-0,088	0,298	0,207
Curicó	0,638	0,424	-0,131	0,424	0,150	-0,001
Graneros	0,377	0,585	0,410	0,585	-0,049	-0,196
Huaquén	0,626	0,303	-0,442	0,303	0,340	0,320
Llico	0,697	-0,221	-0,463	-0,221	0,141	-0,319
Los Choapinos	0,355	0,384	0,252	0,384	-0,113	-0,374
Los Tilos	0,473	0,209	-0,185	0,209	0,103	-0,052
Machalí	0,371	0,152	-0,114	0,152	-0,003	-0,122
Queltehues	0,771	0,117	-0,269	0,117	0,622	0,520
Quimávida	0,512	0,527	0,141	0,527	0,143	-0,037
Quinta de Tilcoco	0,348	0,632	0,491	0,632	-0,152	-0,252
Río Cipreses	0,777	-0,125	-0,350	-0,125	0,536	0,434
Río Clarillo	0,576	0,102	-0,290	0,102	0,285	0,172
San Fernando	0,578	0,369	-0,130	0,369	0,218	0,082
Santo Domingo	0,616	-0,055	-0,314	-0,055	0,283	0,130
Totihue	0,448	0,443	0,029	0,443	0,129	-0,053

Fuente: Elaboración propia.

El hallazgo de correlaciones significativas entre ETP, y variables satelitales y derivadas llevó a realizar la última fase de este estudio, es decir, intentar demostrar que es posible estimar o predecir la ETP en un día o período cualquiera y en toda el área de estudio, con cierta precisión si se aplica una ecuación de regresión múltiple de validez general. Esta ecuación es derivada de la confrontación de la ETP calculada con el método de Penman y la información satelital generada en todo el período de estudio y en todos los observatorios disponibles. Se considera de esta manera toda la variabilidad espacial y temporal contenida en ambos tipos de información. Se utilizaron un total de 2.358 series de datos y se seleccionaron las dos ecuaciones que se muestran en el [Cuadro N° 3](#), una solo con datos satelitales, y otra con datos satelitales y meteorológicos.

Cuadro Nº 3
 ECUACIONES GENERALES DE REGRESIÓN MÚLTIPLE OBTENIDAS
 PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ETP (MM/DÍA) EN EL PERÍODO
 SEPTIEMBRE 1998 - DICIEMBRE 2000

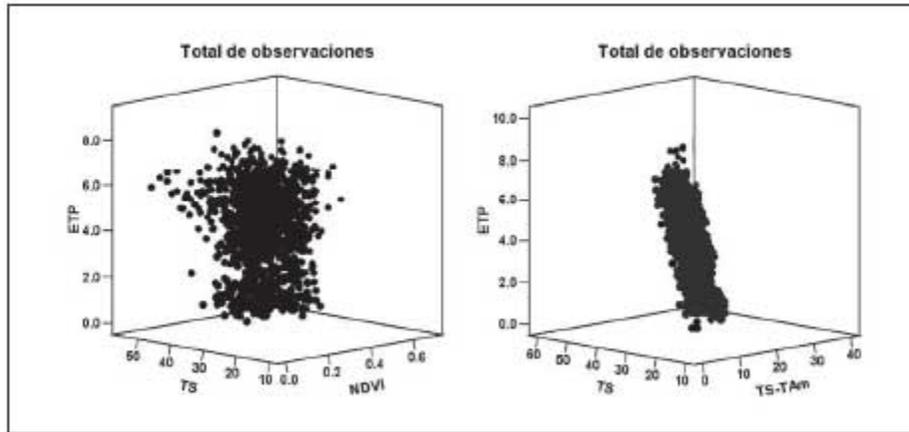
Ecuación 1 Datos satelitales		Ecuación 2 Datos satelitales y meteorológicos	
r	0,763	r	0,870
r ²	0,582	r ²	0,756
r ² ajustado	0,582	r ² ajustado	0,756
Error estándar	1,011	Error estándar	0,771
Constante	-1,512	Constante	-1,501
TS	0,134	TS	0,313
NDVI	3,597	TS-TAm	-0,275

Fuente: Elaboración propia.

En la [Figura Nº 1](#) se presentan los gráficos de dispersión tridimensionales entre las variables que resultaron ser significativas y que fueron recogidas en los modelos presentados en el [Cuadro Nº 3](#). Se grafican todas las observaciones del período septiembre de 1998 diciembre de 2000 y en ellas se aprecia la relación entre tales variables y la ETP.

Figura Nº 1

DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN ENTRE LAS VARIABLES ETP (MM/DÍA), TS (°C) Y NDVI (ADIMENSIONAL), CALCULADAS CON LA ECUACIÓN 1, A LA IZQUIERDA, Y ENTRE LAS VARIABLES ETP (MM/DÍA), TS (°C) Y TSTAM (°C), OBTENIDAS CON LA ECUACIÓN 2, A LA DERECHA



Fuente: Elaboración propia.

Se ponderó la bondad del modelo obtenido con la segunda ecuación, estimando la ETP con ella y evaluando los resultados. Se realizó un análisis de los residuales el cual indicó que el 40,1% de los valores se predicen con una desviación menor al $\pm 10\%$ y el 20,7% con $\pm 5\%$ de error. Por otra parte, el 50,8% de las observaciones de ETP son subestimadas con el modelo generado y el 49,2% son sobreestimadas por el mismo. Según referencias previas, en estudios de estimaciones de ETP como este, son aceptables variaciones de hasta $\pm 10\%$ o bien de ± 1 mm/día. Con la intención de encontrar un modelo que permitiera estimaciones más precisas se hicieron nuevos análisis de regresión, separando los datos según semestres, trimestres, meses y otros períodos; por otra parte, se trabajó dividiendo las estaciones meteorológicas según ámbito climático. Se pretendía con todo esto ver si logrando modelos más específicos, temporal y espacialmente, las estimaciones podrían ser mejoradas. En el [Cuadro Nº 4](#) se comparan los parámetros alcanzados por la ecuación encontrada ([Ecuación 2 en el Cuadro Nº 3](#)) con los obtenidos con nuevas ecuaciones. En la [Figura Nº 2](#) se muestra la dispersión entre valores observados y estimados con las ecuaciones conseguidas en las diferentes pruebas realizadas. Es importante señalar que la técnica empleada, regresión múltiple, es muy poco resistente respecto a los valores más alejados del plano de relación encontrado, lo que se refleja en el valor de fuerza general de la ecuación (r^2 ajustado). Sin embargo, el examen visual de los gráficos de dispersión relacionados permite complementar y matizar los valores numéricos de fuerza obtenidos por el método. Es en esos gráficos donde puede apreciarse la existencia o no de la relación física entre las variables en estudio.

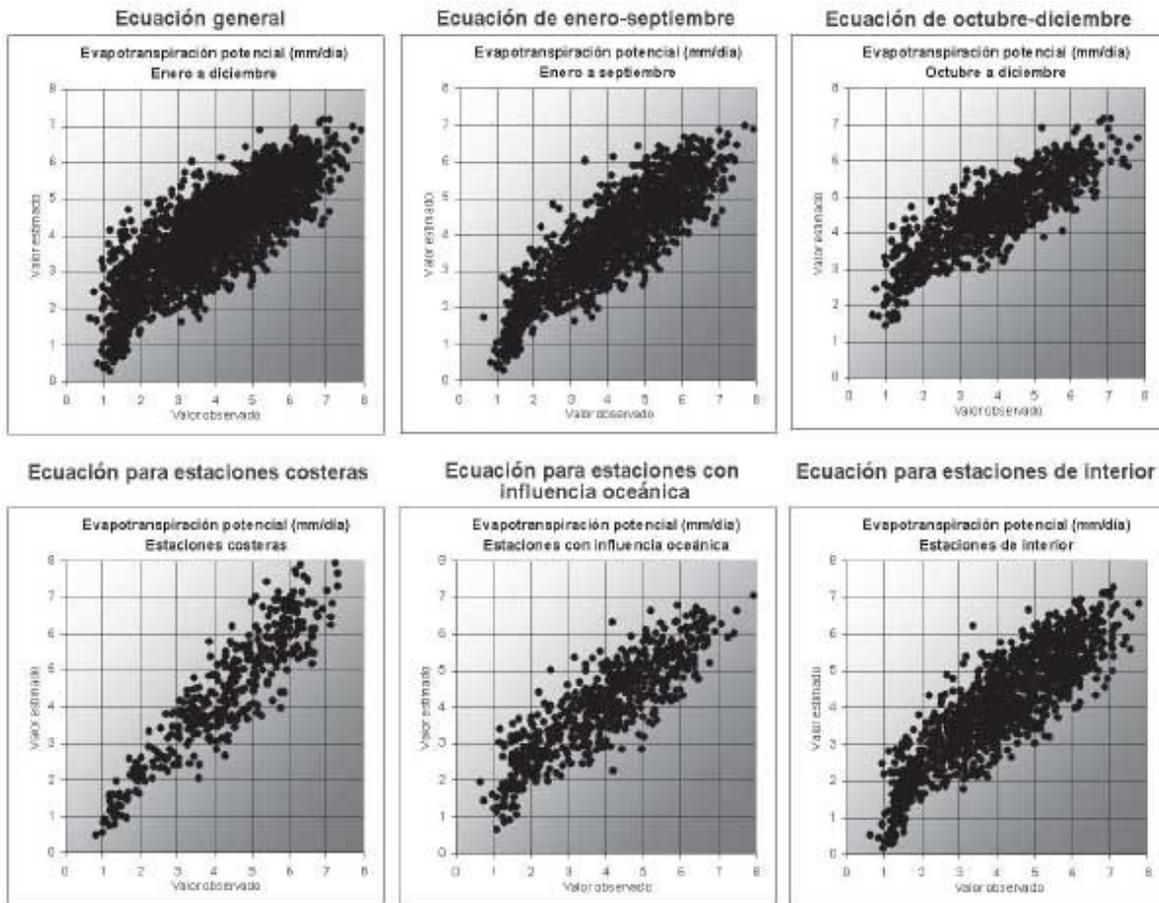
A partir de los resultados del [Cuadro Nº 4](#), se puede decir que el modelo general antes presentado y aplicado obtiene una muy buena estimación de la variable en estudio, la cual explica un 75,6% de la varianza total y es superada solo por las estimaciones del período eneroseptiembre y levemente por las de estaciones de interior. Esto sugiere que la ecuación general representa la variabilidad completa para la ETP, ya que algunas ecuaciones parciales implican que su cálculo fue realizado a partir de distribuciones de puntos más ajustados a una distribución clara por tratarse de espacios más reducidos con características comunes, en tanto que la ecuación general debe considerar la diversidad completa de características presentes en el área de estudio. La diferencia entra las varianzas explicadas por la ecuación general y las específicas no parece lo suficientemente significativa como para preferir estas últimas.

Cuadro N° 4
 PARÁMETROS R², R² CORREGIDO Y ERROR ESTÁNDAR
 DE LA ESTIMACIÓN
 OBTENIDOS EN LAS DISTINTAS PRUEBAS

Análisis		Parámetros		
		r ²	r ² ajustado	Error estándar (mm/día)
Análisis global		0,756	0,756	0,771
Período estacional	Enero-septiembre	0,805	0,805	0,689
	Octubre-diciembre	0,609	0,608	0,696
Ámbito climático	Costa	0,667	0,665	0,775
	Con influencia oceánica	0,747	0,746	0,781
	Interior	0,789	0,789	0,739

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 2
 DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN ENTRE VALORES OBSERVADOS DE
 ETP (MM/DÍA) Y ESTIMADOS CON LAS ECUACIONES DE REGRESIÓN
 MÚLTIPLE GENERADAS

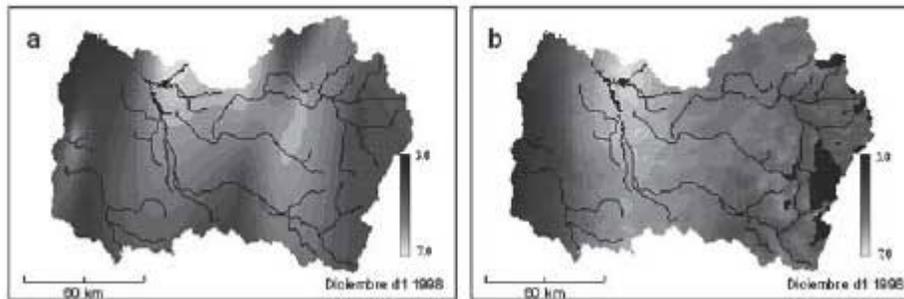


Fuente: elaboración propia.

Con la ecuación general aplicada sobre los datos para las décadas correspondientes se construyeron mapas de ETP para la Región. El conjunto de mapas reproduce una variabilidad espacial y temporal muy marcada y similar a la obtenida con la interpolación espacial con el método de kriging. Se piensa que las discrepancias areales entre ambos conjuntos de mapas son debidas más a las limitaciones que tiene el método de kriging que a una deficiente estimación con las imágenes de satélite; aquel método considera isotrópico el espacio existente entre los puntos muestrales, situación que no ocurre con la información contenida en la imagen. El número y distribución de las estaciones meteorológicas inciden también en la calidad de la interpolación con kriging, así como en la calibración de los modelos. Estas situaciones se reflejan en último término en las diferencias para ciertas zonas, coincidentes en algunos casos, en que son mayores, con áreas no cubiertas con los observatorios disponibles. En la [Figura N° 3](#) se pueden observar las similitudes y diferencias que es posible distinguir entre un mapa (a) interpolado matemáticamente usando el método de kriging y un mapa (b) obtenido con la utilización de variables satelitales, que presenta rasgos marcadamente más naturales, pese a la semejanza general.

Figura N° 3

MAPAS DE ETP (MM/DÍA) OBTENIDOS POR INTERPOLACIÓN (KRIGING) Y CON EL MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, la conclusión general que se desprende de este es que las imágenes NOAAVHRR son útiles en la determinación de la ETP a escala regional. La precisión de las estimaciones fue valorada satisfactoriamente en las estaciones meteorológicas consideradas, únicos puntos que pueden ser evaluados con seguridad. No obstante, la exactitud real de la información generada en cuanto a la ETP en las diferentes etapas, depende de las bondades del método convencional seleccionado y de la certeza de la información derivada de las imágenes satelitales, pues, a partir de sus relaciones se generan los modelos obtenidos.

Notas

¹ Proyecto FONDECYT N° 1040357 Determinación de evapotranspiración potencial (ETP) mediante información satelital a escala regional. Artículo recibido el 28 de febrero de 2006 y aceptado el 13 de octubre de 2006.

³ $R_n = .ET + H + G + PH$ donde: R_n es la radiación neta; $.ET$ es el flujo de calor latente o evapotranspiración donde $.$ es el calor latente de vaporización y ET el flujo de agua evaporada; H es el flujo de calor sensible; G es el flujo de calor del suelo; PH es la energía utilizada en la fotosíntesis y en calentar la biomasa vegetal (Sánchez, 1992).

⁴ $.ET = R_n - H - G$ donde los términos ya han sido definidos en la nota anterior.

⁵ $ET_d = R_{nd} * A - B \times (T_s - T_a)_i$ donde: ET_d es la evapotranspiración real diaria; R_{nd}^* es la radiación neta diaria, expresada en mm/día; A y B son constantes empíricas y $(T_s - T_a)_i$ es la diferencia entre la temperatura del suelo y la temperatura del aire medidas cerca del mediodía.

⁶ La ETP, o evapotranspiración potencial, se puede definir como la máxima cantidad de agua que una superficie totalmente cubierta de vegetación y que no padece de falta de agua puede liberar a la atmósfera en las condiciones atmosféricas del momento en que se realiza el cálculo.

⁷ La ETR, evapotranspiración real, o simplemente ET, es la cantidad efectiva de agua que es devuelta a la atmósfera, en función de las condiciones atmosféricas, vegetacionales y de humedad del suelo del momento.

Referencias bibliográficas

BATRA, N. Estimation and comparison of evapotranspiration from multiple satellites for clear sky days. Cincinnati: Tesis Master of Science in Environmental Engineering, Universidad de Cincinnati, 2005.

[[Links](#)] CASELLES, V.; DELEGIDO, J. & HURTADO, E. Evaluation of the maximum evapotranspiration over the La Mancha region, Spain, using NOAAVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 1992, Vol. 13, Nº 5, p. 939946.

[[Links](#)] CASELLES, V.; DELEGIDO, J. y HURTADO, E. Capítulo X: Teledetección: Aplicación a la determinación de la evapotranspiración. En: MARTÍN DE SANTA OLALLA, F. y DE JUAN, J. (Coord.) Agronomía del Riego. Madrid: Universidad de CastillaLa Mancha, Ediciones MundiPrensa, 1993.

[[Links](#)] CASELLES, V.; ARTIGAO, M.; HURTADO, E.; COLL, C. & BRASA, A. Mapping actual evapotranspiration by combining Landsat TM and NOAAVHRR images: application to the Barrax area, Albacete, Spain. Remote Sensing of Environment, 1998, Vol. 63, p. 110.

[[Links](#)] CHOUDHURY, B. Synergism of multispectral satellite observations for estimating regional land surface evaporation. Remote Sensing of Environment, 1994, Vol. 49, p. 264274.

[[Links](#)] CIHLAR, J.; ST. LAURENT, L. & DYER, J. Relation between the Normalized Difference Vegetation Index and ecological variables. Remote Sensing of Environment, 1991, Vol. 35, p. 279298.

[[Links](#)] COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO Y CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CNRCIREN). Cálculo y cartografía de la evapotranspiración potencial en Chile. Santiago: CNRCIREN, 1997.

[[Links](#)] COLL, C.; CASELLES, V. & SCHMUGGE, T. Estimation of land surface emissivity differences in the splitwindow channels of AVHRR. Remote Sensing of Environment, 1994, Vol. 48, p. 127134.

[[Links](#)] DELEGIDO, J. y CASELLES, V. Evapotranspiración. En: GANDÍA, S. y MELIÁ, J. (Coord.) La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos Naturales. Climatología y Desertificación. Valencia: Universidad de Valencia, 1993, p. 205213.

[[Links](#)] DI BELLA, C.; REBELLA, C. & PARUELO, J. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. International Journal of Remote Sensing, 2000, Vol. 21, Nº 4, p. 791797.

[[Links](#)] JACKSON, R.; REGINATO, R. & IDSO, S. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. Water Resources Research, 1977, Vol. 13, p. 651656.

[[Links](#)] JACKSON, R.; IDSO, S.; REGINATO, R. & PINTER, P. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources, 1981, Vol. 17, p. 11331138.

[[Links](#)] MERLET, H. y SANTIBÁÑEZ, F. Evaluación y cartografía de la

evapotranspiración potencial en la zona de climas mediterráneos de Chile. Boletín Técnico, 1989, Nº 48, p. 2750.

[[Links](#)] MORA, F. & IVERSON, L. On the sources of vegetation activity variation, and their relation with water balance in Mexico. International Journal of Remote Sensing, 1998, Vol. 19, Nº 10, p. 18431871.

[[Links](#)] MORAN, M.; CLARKE, T.; INOUE, Y. & VIDAL, A. Estimating crop water deficit using the relation between surfaceair temperature and spectral vegetation index. Remote Sensing of Environment, 1994, Vol. 49, p. 246263.

[[Links](#)] NAGLER, P.; SCOTT, R.; WESTENBURG, C.; CLEVERLY, J.; GLENN, E. & HUETE, A. Evapotranspiration on western U.S. rivers estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. Remote Sensing of Environment, 2005, Vol. 97, p. 337-351.

[[Links](#)] PATEL, N.; RAKHESH, D. & MOHAMMED, A. Mapping of regional evapotranspiration in wheat using Terra/MODIS satellite data. Hydrological Sciences- Journal-des Sciences Hydrologiques, 2006, Vol. 51, Nº 2, p. 325335.

[[Links](#)] PENMAN, H. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Royal Society London A, 1948, Nº 193, p. 120
146.

[[Links](#)] PRIESTLEY, C. & TAYLOR, R. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Monthly Weather Review, 1972, Nº 100, p. 8192.

[[Links](#)] SÁNCHEZ, M. Características y apreciaciones generales de los métodos de medida y estimación de evapotranspiración. Revista de Geografía Norte Grande, 2000, Nº 27, p. 2736.

[[Links](#)] SÁNCHEZ, M. Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. Revista de Geografía Norte Grande, 2001, Nº 28, p. 310.

[[Links](#)] SÁNCHEZ, M. y CHUVIECO, E. Estimación de evapotranspiración del cultivo de reteferneic, ETo, a partir de imágenes NOAAVHRR. Revista de Teledetección, 2000, Nº 14, p. 1121.

[[Links](#)] SÁNCHEZ T., M. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología. Logroño: Geoforma Ediciones, 1992.

[[Links](#)] SEGUIN, B.; ASSAD, E.; FRETEAID, J.; IMBERNON, J.; KERR, Y. & LAGOUARDE, J. Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions. International Journal of Remote Sensing, 1989, Vol. 10, Nº 6, p. 11011117.

[[Links](#)] SEGUIN, B.; LAGOUARDE, J. & SAVANE, M. The assessment of regional crop water conditions from meteorological satellite thermal infrared data. Remote Sensing of Environment, 1991, Vol. 35, p. 141148.

[[Links](#)] SEGUIN, B. NOAA/AVHRR data for crop monitoring at a regional level: possibilities and limits in the european context. EARSel Advances in Remote Sensing, 1993, Vol. 2, Nº 2, p. 8793.

[[Links](#)] SEGUIN, B.; COURAULT, D. & GUÉRIF, M. Surface temperature and

evapotranspiration application of local scale methods to regional scales using satellite data. Remote Sensing of Environment, 1994, Vol. 49, p. 287295.

[[Links](#)] WIEGAND, C. & RICHARDSON, A. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield, I. Rationale. Agronomy Journal, 1990, Vol. 82, p. 623629.

[[Links](#)] YANG, W.; YANG, L. & MERCHANT, J. An assessment of AVHRR/NDVIecoclimatological relations in Nebraska, U.S.A. International Journal of Remote Sensing, 1997, Vol. 18, N° 10, p. 21612180. [[Links](#)]