CARACTERIZACIÓN Y ZONIFICACIÓN EDÁFICA Y CLIMÁTICA DE LA REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE

Luis Morales S.[1,2], Fabricio Canessa M.[2], Cristian Mattar[2], Raúl Orrego[2], Francisco Matus[3]

1.- Departamento de Física, Universidad Tecnológica Metropolitana. Casilla 9845, Santiago, Chile. Correo electrónico: lmorales@utem.cl

2.- Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Universidad de Chile. Casilla 1004, Santiago, Chile.

3.- Departamento de Ciencias Químicas, Universidad de La Frontera. Casilla 54-D Temuco, Chile.

Characterization and edafic and climatic zonification in the Region of Coquimbo, Chile

Keywords: Edafic and climatic classification, topoclimatology, multiple regression, cluster Analysis.

ABSTRACT

This study consisted in the evaluation and classification of edaphic and climatic resources in the Coquimbo´s Region using topoclimatics algorithms and satellite images, integrated in GIS environment. We used 78 climatic stations where mean annual and monthly precipitation and mean annual and monthly temperature, relative humidity and solar radiation were recorded. Isolines cartography and a digital elevation model in scale 1:250.000 were also used. To estimate the spatial distribution of the climatic variables, we tested different multiples regressions between topographic variables and climate data. This process conduced to the elaboration of a spatialized matrixes of climatic variables in 1:250.000 scale. This procedure allowed us to calculate variables such as sum of temperature, cumulative cold hours, free frost period, potential evapotranspiration, humidity index, for examples, and compare regression and lineal interpolation spatialization methods. To make the topoclimatic division a multivariate analysis was used. Particularly, clusters analysis with a K-means algorithm was conducted and 17 thermal, hydrical and energetical climatic variables were considered. Our results showed 37 topoclimatic districts cross-checked with different soil (serie level) obtaining a edafic and climatic (Edafoclimatic) classification of about 1.292 zones. This classification was though to be useful tool to organize agricultural goal activities.

Palabras Claves: clasificación edafoclimática, topoclimatología, regresión multivariada, análisis Cluster

RESUMEN

Este estudio consistió en la evaluación y clasificación de los recursos climáticos y edáficos en la región de Coquimbo, usando algoritmos topoclimáticos e imágenes de satélite integrados en un ambiente SIG. Se usaron 78 estaciones climáticas con mediciones de precipitación media anual y mensual, temperatura media anual y mensual, humedad relativa y radiación solar. Se utilizó también cartografía de isolineas y un modelo digital de elevaciones escala 1:250.000. Para determinar la distribución espacial de las variables climáticas se probaron regresiones múltiples entre variables topográficas y datos climáticos. Este proceso condujo a la elaboración de matrices con las variables climáticas espacializadas en una escala 1:250.000. Mediante este procedimiento se calcularon variables como la suma de temperaturas, horas de frío, periodo libre de heladas, evapotranspiración potencial e índices de humedad entre otros, comparando además métodos de espacialización multiregresivos y de interpolación lineal. Para realizar la clasificación topoclimática se ha usado un método de análisis multivariado. Particularmente un análisis cluster mediante un algoritmo K-means, sobre 17 variables térmicas, hídricas y energéticas. Como resultado se han obtenido 37 distritos topoclimáticos los cuales se han tabulado y cruzado con suelos (a nivel de serie) obteniendo una clasificación edáfica y climática (Edafoclimática) con 1.292 zonas. Esta clasificación se muestra como útil para la planificación de actividades agrícolas.

INTRODUCCIÓN

Una zonificación edáfica y climática (edafoclimática) corresponde a la detección de áreas geográficas homogéneas en sus características climáticas y edáficas. Tanto a nivel mundial (Köppen , 1948; Thornthwaite, 1948; Bagnouls y Gaussen, 1957) como a nivel nacional Di Castri y Hayek, 1975; FAO, 1985; Novoa *et al,* 1989; Santibáñez y Uribe, 1993; Amigo y Ramírez, 1998) se han desarrollado diversos métodos de clasificaciones climáticas. Estas clasificaciones varían en cuanto a los métodos utilizados para llevar a cabo el proceso de zonificación, las escalas cartográficas en que se han realizado y el uso de la tecnología disponible en la época en que se generaron.

En la última década diversas plataformas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), elaboración de métodos geoestadísticos avanzados y tecnologías en teledetección, han permitido la generación de distintas zonificaciones con mayor grado de precisión (Tonietto, 2005). Entre ellas, se conocen las realizadas en Francia para el cultivo de la vid y la producción de vinos, integrando características climáticas, edáficas y productivas en el concepto de Terroir (Tonietto y Carbonneau, 2002), o las realizadas en Alemania con miras a detectar las condiciones microclimáticas a través del 'Klimaeignunskarte' (Ihl, 1991). En Chile la primera zonificación edafoclimática a escala 1:250000 se realizó por Matus *et al*. (2005) por la superposición de mapas de clima y suelo.

En el último tiempo han existido avances tecnológicos en cuanto al análisis y tratamiento de los datos y las relaciones espaciales, encontrándose una solución al problema en geoestadística del cumplimiento de uno de los principios de la estacionaridad en los casos en que no existe a través de la aplicación de modelos de regresión múltiple de carácter global o local (Fotheringham *et al*., 2000). De igual manera, la adecuación de muchos de estos modelos a plataformas SIG ha permitido aplicaciones a grandes matrices de datos, hecho que resulta valioso en aplicaciones de clasificaciones edafoclimáticas.

En el presente trabajo se muestra una aplicación de zonificación edafoclimática mediante la utilización de: técnicas topoclimáticas a través de regresiones múltiples para la espacialización de variables climáticas en el área de estudio y su comparación con métodos tradicionales de espacialización como la interpolación lineal, imágenes satelitales NOAA-AVHRR y cartografía de suelos, mediante el uso de SIG.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio, variables climáticas y topográficas

El estudio se realizó para la Región de Coquimbo, la que se encuentra en Chile Central (29° 20' – 32° 10' Lat. Sur y 69° 49' – 71° 43') abarcando una superficie aproximada de 40.580 km^2. Esta zona presenta diversos climas de transición entre desérticos y templados mediterráneos (Inzunza, 2000). La Figura 1 muestra la zona de estudio.

Para la realización de la zonificación climática se utilizaron datos provenientes de 78 estaciones meteorológicas distribuidas en la Región, las cuales fueron seleccionadas bajo el criterio de un número mínimo de 10 años de funcionamiento continuo (OMM, 2003). Esta selección deriva del hecho de que en la Región las estaciones meteorológicas han funcionado bajo varios criterios, lo que produjo una discontinuidad de la toma de datos e incluso su cierre. Los datos obtenidos de ellas son promedios mensuales y correspondieron a precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa, presión, dirección y velocidad del viento. Cabe señalar que las estaciones presentaban aglomeración en su distribución espacial y heterogeneidad en el tipo y calidad de los datos. La distribución espacial de las estaciones

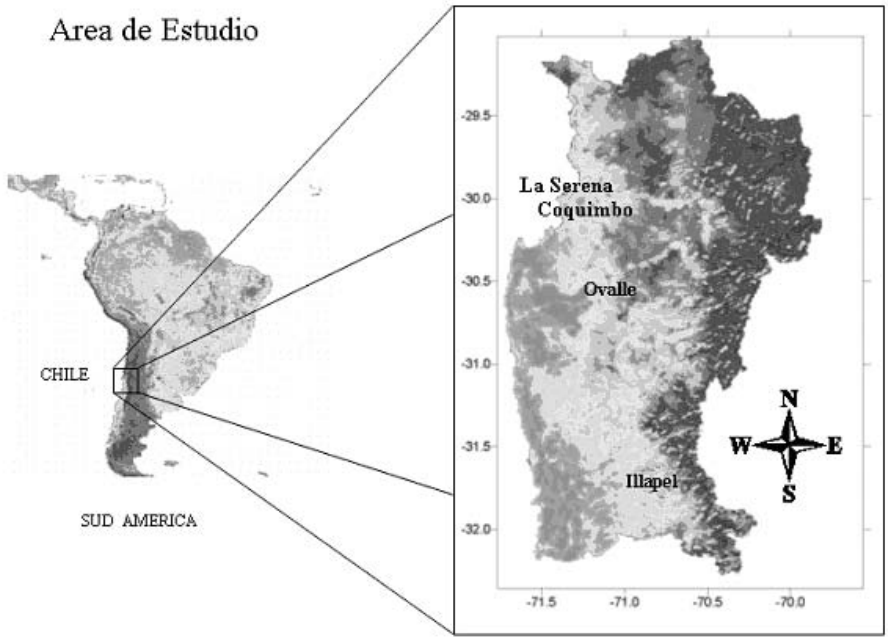


Figura 1. Área de estudio con las principales ciudades de la Cuarta Región.
Figure 1. Study Area with the most important cities of the Fourth Region.

se encuentra concentrada en zonas bajo 1.500 m.s.n.m. y en los valles principales de la Región, normalmente asociados a actividad agrícola, lo que para efectos de una buena espacialización topoclimática no es optimo. También se recopilaron estudios climatológicos anteriores, principalmente los realizados por Caldentey y Pizarro en 1980 y los relativos al Atlas Agroclimático de Chile de 1992, de tal forma de contar con cartografía analógica de isolíneas en mapas impresos para poder comparar con los resultados obtenidos por este trabajo. La cartografía analógica se utilizó para extraer datos en áreas donde no existe una cobertura apropiada de estaciones meteorológicas, además de ser usada como referencia del comportamiento de la variable una vez hecho el cálculo de la espacialización.

Para caracterizar las variables topográficas, se utilizó información de curvas de nivel digitalizadas a partir de un mapa a escala 1:250.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM). De esta información se obtuvo un modelo digital de elevación, del cual se calculó pendiente y exposición (Ihl, 1991). Con toda la información se generó una base de datos con cada una de las variables climatológicas consideradas y para cada estación meteorológica. Cada variable contaba con la posición georeferenciada (latitud y longitud) y sus variables topográficas, como altura, exposición, pendiente, distancia al mar y distancia a la red hídrica. Todos los cálculos fueron hechos en el sistema de información geográfica IDRISI (Eastman, 1999), y programas diseñados para este trabajo en visual Basic. El programa IDRISI fue utilizado porque presenta variadas herramientas para el manejo matricial de datos, con una estructura que es posible, además, utilizar programación computacional.

La información y cartografía de ordenes de suelos fue obtenida a partir dos estudios realizados por Luzio (1986; 1992) para las zonas áridas y semiáridas de Chile. La cartografía en papel fue digitalizada y procesada con el SIG IDRISI v 15.

Modelación topoclimática

La modelación de las distintas variables climáticas fue realizada mediante la aplicación de un modelo matemático descrito por la ecuación (1).

$$F(x_1, x_2, \ldots\ldots x_n) = \sum_{j,k,n,m=1} a_j x_{k_1}^{n_1} \; x_{k_2}^{n_2} \; \ldots . x_{k_n}^{n_m} \qquad (1)$$

Donde $F(x_1, x_2, \ldots\ldots x_n)$ representa a una variable climatológica en un período de tiempo cualquiera, x es una variable descriptora, que puede ser latitud, longitud altitud, distancia al litoral, pendiente, entre otras, y a_j coeficientes del ajuste (Qiyao, 1991; Canessa, 2006). Con estas relaciones se calcularon matrices de datos para cada variable climatológica en formato matricial binario (FMB, raster) y para los meses de enero y julio. El FMB es utilizado en este trabajo, porque corresponde al formato propio del programa IDRISI para la caracterización espacial de variables continuas. A partir de estas matrices se derivaron parámetros bioclimáticos agrupados en cuanto a su carácter hídrico, térmico o energético. El estado de la superficie del área de estudio se caracterizó mediante un índice radiométrico, calculado desde imágenes de satélite. Específicamente se utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI, el cual fue calculado a partir de imágenes AVHRR (Advanced Very Hight Resolution Radiometer) a bordo de los satélites de la serie NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration Satellite). Estas imágenes fueron obtenidas

en el sitio web de EROS (Earth resources observation and Science), dependiente del gobierno de Estados Unidos (NOAA, 2000). Este conjunto de imágenes vienen georeferenciadas al datum WGS84, y corresponden a los promedios entre los días 1-10, 11-20 y 21-31 de cada mes en el intervalo 1982 – 2002, y para las bandas espectrales del satélite en las regiones del infrarrojo cercano (0,725 – 1,1 μm) y rojo (0,58 – 0,68 μm). Cada una de ellas fue corregida atmosféricamente utilizando el código SMAC (Simplified Method for the Atmospheric Correction) desarrollado por Rahman y Dedieu (1994).

El NDVI es usado para caracterizar el estado fotosintético de la vegetación a partir de la combinación de dos bandas espectrales situadas en el espectro visible, en el rojo y en el infrarrojo próximo. Es en estas dos zonas espectrales donde aparece la principal diferencia entre la vegetación sana, vigorosa, y con alto contenido de humedad y la vegetación enferma o senescente, además de los suelos. Los suelos aparecen para valores inferiores a 0,2 en este índice, que varía entre -1 y 1. (Mc Millin, 1975; Fusco y Muirhead, 1987; Chuvieco, 1996).

La radiación solar global, con la cual se calcularon variables agroclimáticas radiativas, fue obtenida mediante la utilización del modelo PINSOL (Seyfried, 2003), mejorado mediante la incorporación de cobertura nubosa. El modelo PINSOL funciona calculando la radiación solar teórica y no considera el efecto atmosférico para estimar la radiación en superficie. Este modelo fue modificado, de tal forma que calculara radiación solar difusa y directa, como funciones de la transmisividad atmosférica y la radiación solar potencial, incorporando el espesor óptico atmosférico, entre otros parámetros al cálculo de la radiación solar global media diaria. Adicionalmente este modelo fue complementado con una rutina que contiene el calculo de la nubosidad a partir de la distancia relativa de una estación meteorológica al lugar de presión máxima en Chile LPM (Saavedra *et al*, 2002), de forma tal de incorporar el efecto de la transparencia atmosférica como función de la cobertura nubosa (Iqbal, 1983). El uso de un modelo en lugar de datos medidos se debe principalmente a la escasez de estaciones con registros solarimétricos en la zona de estudio. Este modelo incorpora variables topográficas como pendiente y exposición calculadas a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE). Cabe señalar que no se realizó un análisis de errores medios cuadráticos sobre esta variable, como si se efectuó en variables térmicas e hídricas, debido a la escasez de los datos**.**

Clasificación climática

La clasificación climática consiste en la división del territorio en áreas más pequeñas, homogéneas desde el punto de vista espacial (Qiyao *et al.*, 1991). Este proceso se llevó a cabo mediante la aplicación de un análisis de clusters utilizando el algoritmo K-means. Este método se basa en la distancia euclidiana como medida de cuantificación de la similitud (ecuación 2), para la clasificación automática de datos en grupos homogéneos previamente desconocidos (Pérez, 2004),

$$D_e = \sqrt{\sum_{i=1}^{p} \left(x_{ri} - x_{si} \right)^2} \qquad (2)$$

Donde D_e corresponde a la distancia euclidiana, X_{ri} a una de las variables en estudio perteneciente al objeto r_i, X_{si} a la misma variable de estudio perteneciente al objeto s_i y P al número de objetos a clasificar. Los objetos corresponden a cada uno de los elementos ordenados en una matriz (imagen), llamados píxeles (picture

element). Finalmente las propiedades asociadas a ese elemento se almacenan en un arreglo vectorial, cuyos elementos corresponden a cada una de las variables climatológicas consideradas.

Clasificación edafoclimática

Esta es realizada a través de un método de unión cartográfica llevado a cabo mediante un proceso estadístico de tabulación cruzada o Crosstab en ambiente IDRISI. Este procedimiento consiste en la superposición de las categorías de dos matrices diferentes, de manera de obtener una nueva matriz que contenga la combinación de las categorías de las imágenes originales (Carstensen, 1987). Este proceso se realiza entre la imagen de clasificación climática calculada a escala 1:250.000 y la cartografía de suelos se llevó a la misma escala, de tal forma que el resultado entrega polígonos homogéneos por clima y suelo a la misma escala espacial de la cartografía usada como base para la unión cartográfica.

Análisis de los datos

El estudio de las variables climatológicas se realizó mediante análisis multivariante de datos. Para el análisis de la regresión múltiple se usó el programa computacional StathGraphics Plus v 5.1, utilizando el método de regresión 'Stepwise' forward. Las variables utilizadas explicativas corresponden a: posición, altitud, pendiente, exposición, distancia al litoral, distancia a la red hídrica y lagos, e índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), obtenido a partir de datos satelitales NOAA-AVHRR.

El análisis de cluster fue realizado a través del programa estadístico SPSS v 14.0 mediante el método de K-means, ya que posee la capacidad de utilizar un número mayor de datos. La información necesaria para este proceso fue convertida a formato SPSS mediante un código computacional en Visual Basic Professional v 6.0 (SPSSIDRI). Esto fue necesario realizarlo, debido a que la información requerida esta en formato matricial binario para el software IDRISI v 15. Finalmente los resultados obtenidos se sometieron a un análisis de varianza comparando los centroides iniciales y finales de los distritos encontrados, (Prueba F, $p \leq 0,05$) (Shannon, 1988; Pérez, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación de parámetros térmicos

En la Figura 2 se muestra la temperatura máxima del mes de enero (TMXE) como un ejemplo de aplicación del método en la especialización de variables climatológicas. Para su estimación se usó una regresión múltiple (Ecuación 1), la cual expresa la variabilidad espacial de la TMXE como una combinación lineal de variables como la latitud (LAT), longitud (LON), altitud (ALT), distancia a la red hídrica (DRH), distancia al mar (DL),….etc, y de estado de la superficie representado por el NDVI. La regresión múltiple 'Step-wise Forward' mostró que en conjunto las variables que predijeron significativamente la TMXE fueron: LAT ($R = 0,9965$), DL ($R = 0,9969$) y DRH ($R = 0,9987$) (ver Cuadro 1). El resto de las variables quedaron fuera de la ecuación final aunque había varias de ellas con correlaciones significativas.

La ecuación 3 muestra el resultado del análisis 'Step-wise Forward' para una

$$TMXE = 0{,}00125 \cdot ALT + 1{,}335 \cdot DL + 0{,}25 \cdot DRH - 0{,}81 \cdot LAT - 0{,}042 \cdot DRH^2 - 0{,}0011 \cdot DL^2 + 0{,}038 \cdot DL \cdot LAT \quad (3)$$

Cuadro 1. Variables significativas encontradas por la regresión step-wise en la determinación de un modelo espacial para la temperatura media máxima de enero, TMXE.

Table 1. Significant Variables found by Stpe-wise regresion in determination of a spatial model for january mean maximun temperature, TMXE.

Variable [1]	**r ajustado**	**r^2 ajustado**
ALT	0,9993	0,9986
DL	0,9984	0,9969
DRH	0,9993	0,9987
LAT	0,9982	0,9965
DRH^2	0,9993	0,9987
DL^2	0,9992	0,9985
DL*LAT	0,9988	0,9976

[1] Para el nombre de la variables ver ecuación 3. Todas las variables presentaron una probabilidad < 0,01.

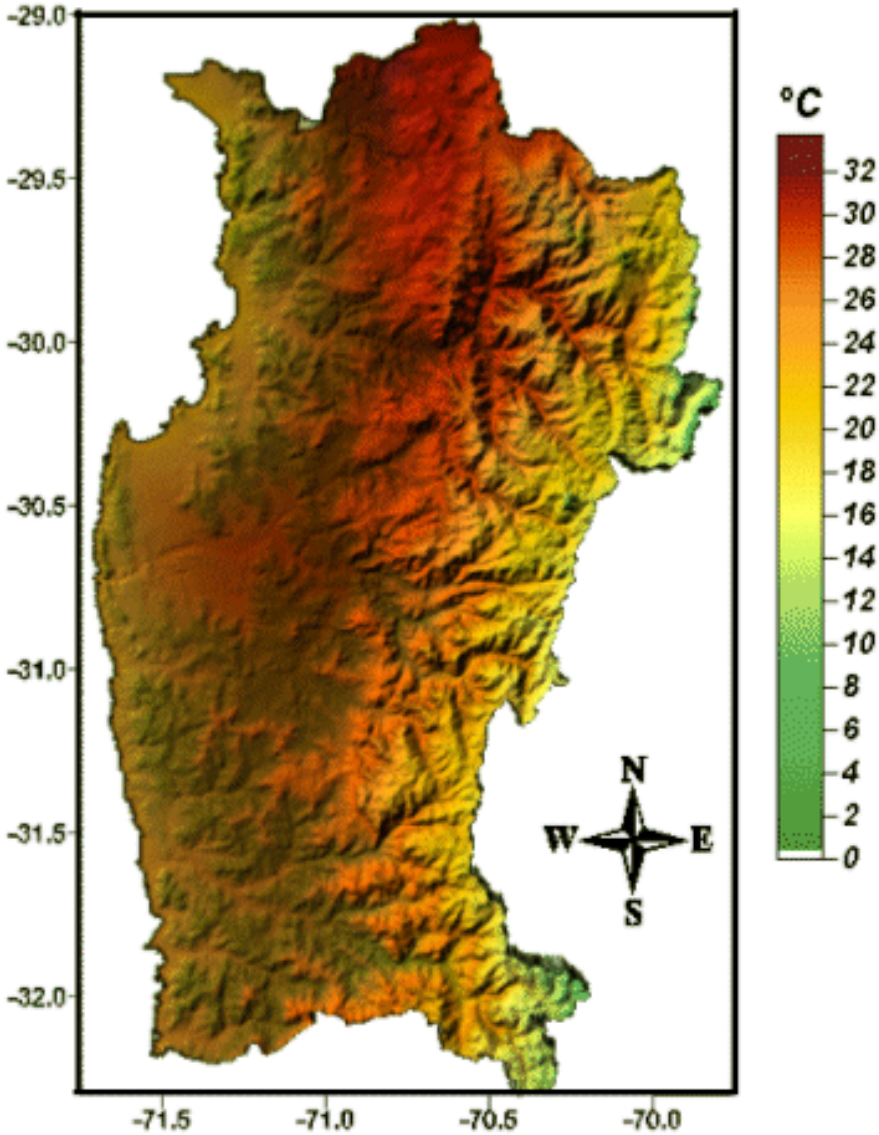


Figura 2. Temperatura media máxima de Enero en °C.
Figure 2. Maximum mean temperature of January in °C.

Cuadro 2. Estadísgrafos y errores medios cuadráticos comparativos entre método topoclimático e interpolación lineal, donde TXE y TNE son las temperaturas máximas y mínimas medias para Enero y TXJ y TNJ son las temperaturas máximas y mínimas medias para Julio.

Table 2. Statistical significant values and comparatives RMSE between topoclimatic lineal, interpolation methods, where TXE and TNE are the mean maximum and minimum temperatures for January and TXJ and TNJ are the mean maximum and minimum temperatures for July.

Variable [1]	**R^2** (%)	**RMSE** [2] **Topoclimático °C**	**RMSE**[1] **Interpolación Lineal °C**
TXE	99,87	3,25	5,3
TNE	8,86	2,7	3,55
TXJ	9,74	3,02	4,71
TNJ	9,31	2,9	4,3

[1] Para el nombre de la variables ver ecuación 3. Todas las variables presentaron una probabilidad < 0,01.
[2]Cuadrado medio del error.

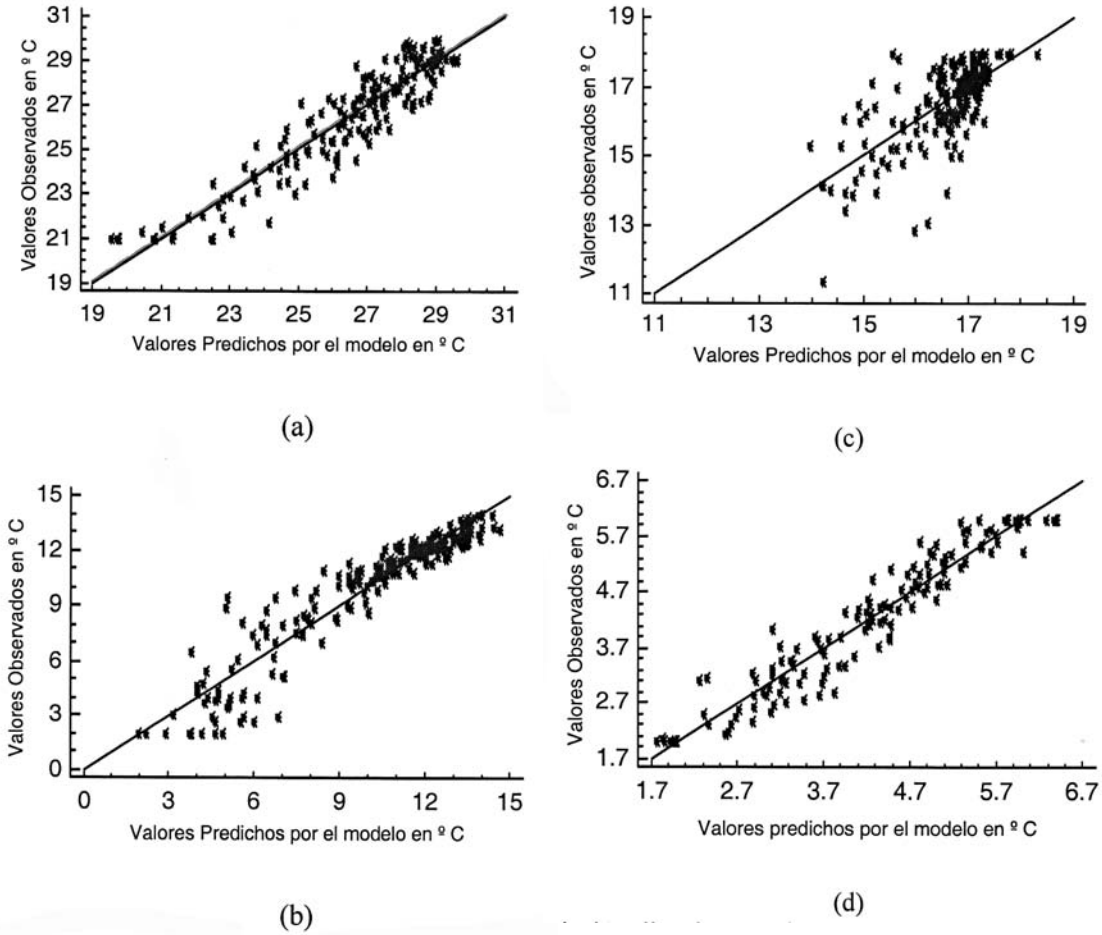


Figura 3. Asociación lineal entre los valores observados y predichos para (a) temperaturas máxima media de Enero, (b) temperatura mínima media de Enero, (c) temperatura máxima media de Julio y (d) temperatura mínima media de Julio.

Figure 3. Lineal association between predicted and observed values for (a) mean maximum temperature for January, (b) mean minimum temperature for January, (c) mean maximum temperature for July y (d) mean minimum temperature for July.

combinación dada por la ecuación 1, con la cual es posible explicar el 99.8 % ($P < 0.05$) de la variación de TMXE.

Para calcular la regresión fue necesario considerar el coeficiente de determinación ajustado debido a que el número de casos era inferior a 100. En base a los coeficientes obtenidos, las variables DL y DRH son significativas en el modelo producto de la dependencia de la temperatura con la cercanía a los cuerpos de agua (Qiyao, 1991). Esto se explica por las diferencias que existen en la distribución espacial de las temperaturas producto de la inercia térmica del suelo y del agua, dando origen al fenómeno de continentalidad, sin embargo la relación no es lineal (Barry y Chorley, 1998).

En la Figura 2 se observa la influencia topográfica en la distribución de la temperatura, hecho que no puede ser discriminado y cuantificado por los métodos tradicionales. En efecto, se aprecian claramente los valles principales de la Región, como el Elqui, Limarí y el Choapa, así como las valles menores que componen a estos. El resultado muestra la existencia de cuatro núcleos cálidos: el primero ubicado al norte del río Elqui, en la zona precordillerana en el extremo norte, un segundo en la zona sur del río Elqui y la precordillera central de la Región, un tercer núcleo asociado a cuerpos artificiales de aguas (grandes embalses) ubicados en el valle del Limarí en la zona central de la Región, y un cuarto núcleo de menor magnitud a los anteriores, se encuentra en la zona sur de la Región, en la desembocadura del río Choapa.

En el Cuadro 2 se presentan los valores estadísticos y la comparación con el método de interpolación lineal de espacialización.

En el Cuadro 2 se observa que los errores medios cuadráticos del modelo topoclimático son menores en comparación con una interpolación lineal entre isolíneas. Esta comparación se realiza para tener una aproximación al error que actualmente se comete al interpolar entre isolíneas en un mapa. Este resultado muestra que el método utilizado para las temperaturas, presenta una mejora en la estimación de valores entre isolíneas, respecto a los métodos hasta ahora utilizados con frecuencia en Chile.

Cuadro 3. Variables significativas encontradas por la regresión step-wise en la determinación de un modelo espacial para la precipitación media anual, PPA.

Table 3. Significant Variables found by Stpe-wise regresion in determination of a spatial model for mean annual rainfall, PPA.

Variables [1]	**r ajustado**	**r^2 ajustado**
ALT	0,9883	0,9767
LON	0,9797	0,9599
DL^2	0,9864	0,9729
LAT^2	0,9885	0,9771
LON^2	0,9810	0,9624

[1] Para el nombre de la variables ver ecuación 3. Todas las variables presentaron una probabilidad < 0,01.

La Figura 3 se muestra la asociación lineal entre los valores observados y predichos para las temperaturas extremas de enero y julio. Específicamente la Figura 3a y 3b muestra la temperatura máxima y mínima media de Enero respectivamente. En tanto que la Figura 3c y 3d muestran la temperatura máxima y mínima media de Julio respectivamente.

Estimación de los parámetros hídricos

La precipitación media anual se presenta en la Figura 4, y la ecuación de regresión multivariada que la origina es la ecuación 4.

La ecuación anterior muestra el modelo de especialización de las precipitaciones donde ALT es la altura, DIL la distancia litoral, LON la longitud y LAT la latitud, además todos los coeficientes son significativos al 95% de confianza ($p<0,05$). ALT también influye en la distribución espacial de las precipitaciones, sin embargo el efecto que genera es menor, lo cual se interpreta a partir del coeficiente de este parámetro en la regresión obtenida. La regresión múltiple 'Step-wise Forward' mostró que en conjunto las variables que predijeron significativamente la PPA fueron:
LON ($R = 0.9599$) y LAT^2 ($R = 0.9771$) (ver Cuadro 3).

La asociación lineal entre la precipitación observada y la predicha se muestra en la Figura 5, presentando un coeficiente de determinación de 97,76% ($p<0,05$).

La Figura 4 muestra una distribución de las precipitaciones marcada por la influencia posicional, donde la longitud es la variable más influyente. Esto se corrobora con la ecuación 4, la cual muestra la importancia relativa del coeficiente de la longitud. Al igual que la Figura 3, las variaciones de la precipitación se ajustan a las variables fisiográficas, notándose su efecto en la distribución espacial.

Estimación de la radiación global incidente

A partir del modelo PINSOL se calcularon los valores de radiación solar global medios mensuales. Como ejemplo, la Figura 6 muestra el resultado del cálculo de la radiación solar global media anual.

La distribución de radiación solar se ve afectada por el régimen anticiclónico de la Región, las áreas bajas costeras presentan en gran parte del año una importante cobertura nubosa del tipo estratocúmulos (Ihl, 1991), debido a esto, sumado a las características orográficas de los valles transversales presentes en la Región, las zonas bajas y planas presentan una menor radiación, aumentando esta con un gradiente oeste-este moderado desde los 12 a los 19 MJ m^{-2} al año.

Latitudinalmente, en sentido norte-sur, no se observan gradientes significativos. Por esto, los parámetros mas influyentes en la generación de condiciones topoclimáticas en cuanto a la radiación en esta Región, son la altura y la exposición.

$$PPA = -298846 + 0.0059 \cdot ALT - 8368.13 \cdot LON + 0.0057 \cdot DIL^2 + 1.133 \cdot LAT^2 - 58.763 \cdot LON^2 \quad (4)$$

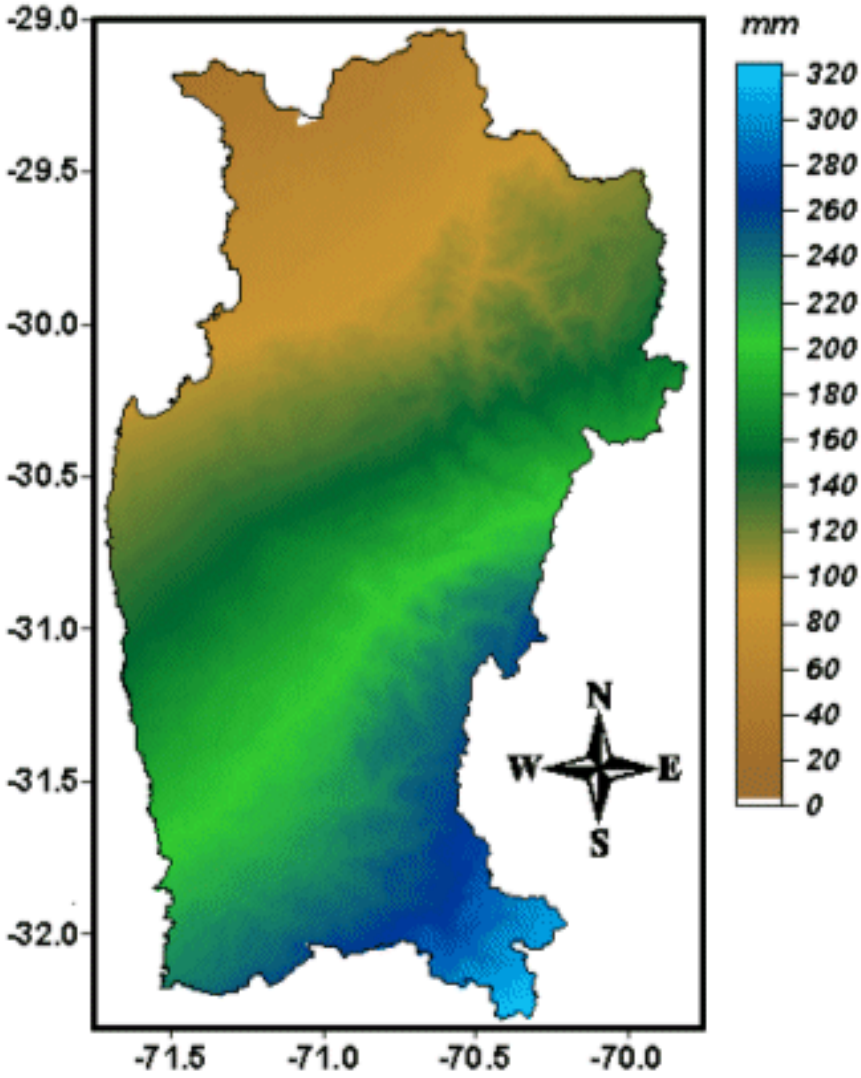


Figura 4. Precipitación media anual en milímetros.
Figure 4. Mean annual rainfall in millimeters.

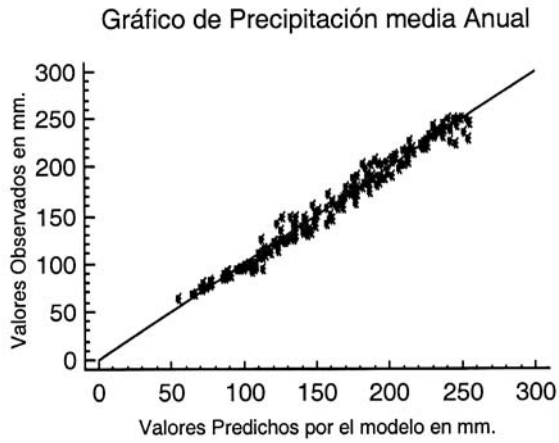


Figura 5. Valores observados y predichos para la precipitación media anual en mm.
Figure 5. Observed and predicted values for mean annual rainfall in mm.

Clasificación Topoclimática

Mediante la aplicación de un análisis de clusters no jerárquico a través del algoritmo K-means sobre las variables utilizadas, se consiguió definir para el área de estudio un total de 37 distritos topoclimáticos con tamaños del orden de los 700 km^2 en promedio. En la Figura 7 se presenta la zonificación estimada.

Para cada uno de los distritos generados se elaboró una base de datos que contiene las características climáticas promedio y una descripción fisiográfica y geográfica.

Clasificación Edafoclimática

La clasificación de órdenes de suelos (Alcayaga y Luzio, 1986) utilizada en la clasificación edafoclimática se muestra en la Figura 8, y los códigos para su interpretación se presentan en el Cuadro 4.

Para cada uno de los distritos edafoclimáticos generados se elaboró una tabla con las características topoclimáticas y edáficas principales del mismo. En la Figura 9 se presenta la clasificación edafoclimática obtenida para la Región de Coquimbo.

La Figura anterior muestra los 1.292 distritos edafoclimáticos obtenidos, los cuales establecen la variación espacial de las características climáticas y edáficas del área de estudio, según la resolución espacial de trabajo. El efecto topográfico es marcado, distinguiéndose zonas características, como bosques relictos (costa central de la Región), valles centrales y distritos que engloban la mayor parte de la cordillera de los Andes. En la Figura 10 se presenta a modo de ejemplo un distrito edafoclimático y en el Cuadro 5 las características climáticas y edáficas principales del mismo.

En la Figura 10 es posible destacar que el distrito edafoclimático calculado, al considerar las variables orográficas y distancia a los cuerpos de agua, su límite sur coincide con el cauce del río Limarí, evidenciando la precisión del método.

El método empleado para la espacialización de variables climáticas constituye una mejora a los actuales

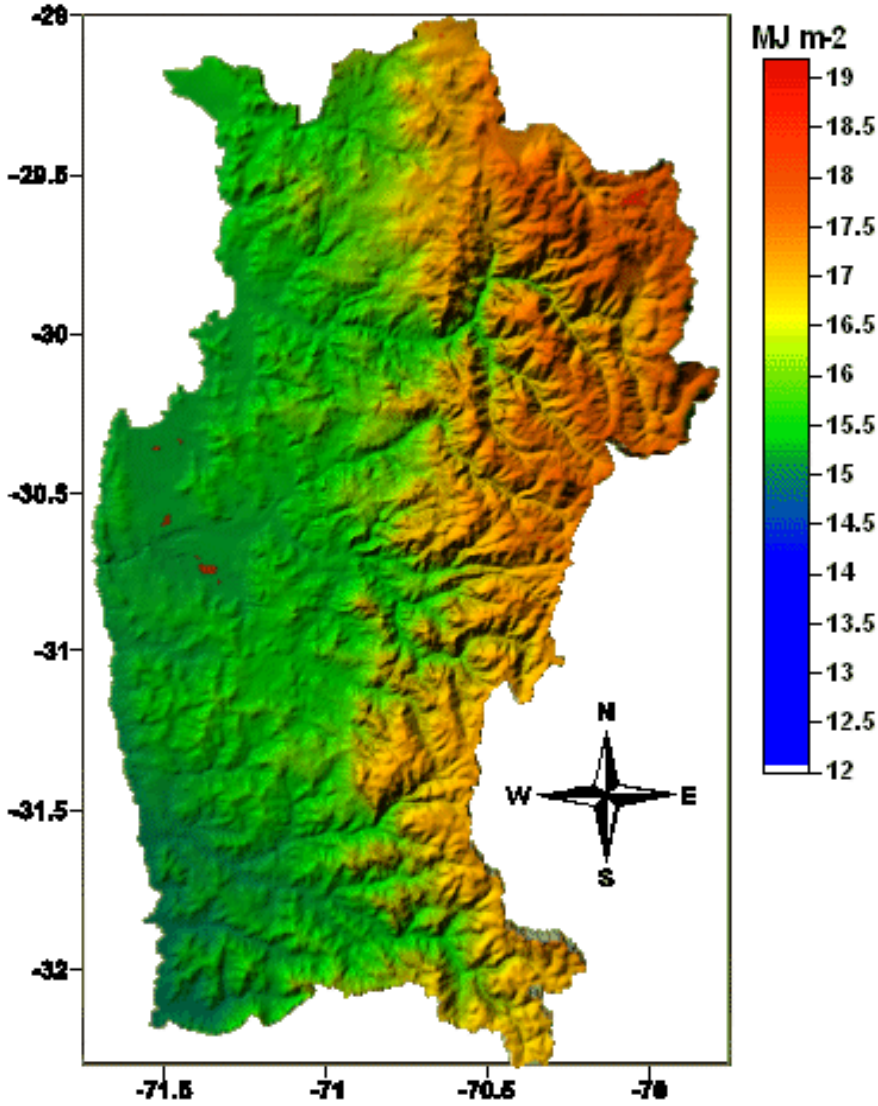


Figura 6. Radiación solar media anual en MJ m^{-2}.
Figure 6. Mean annual solar radiation in MJm^{-2}.

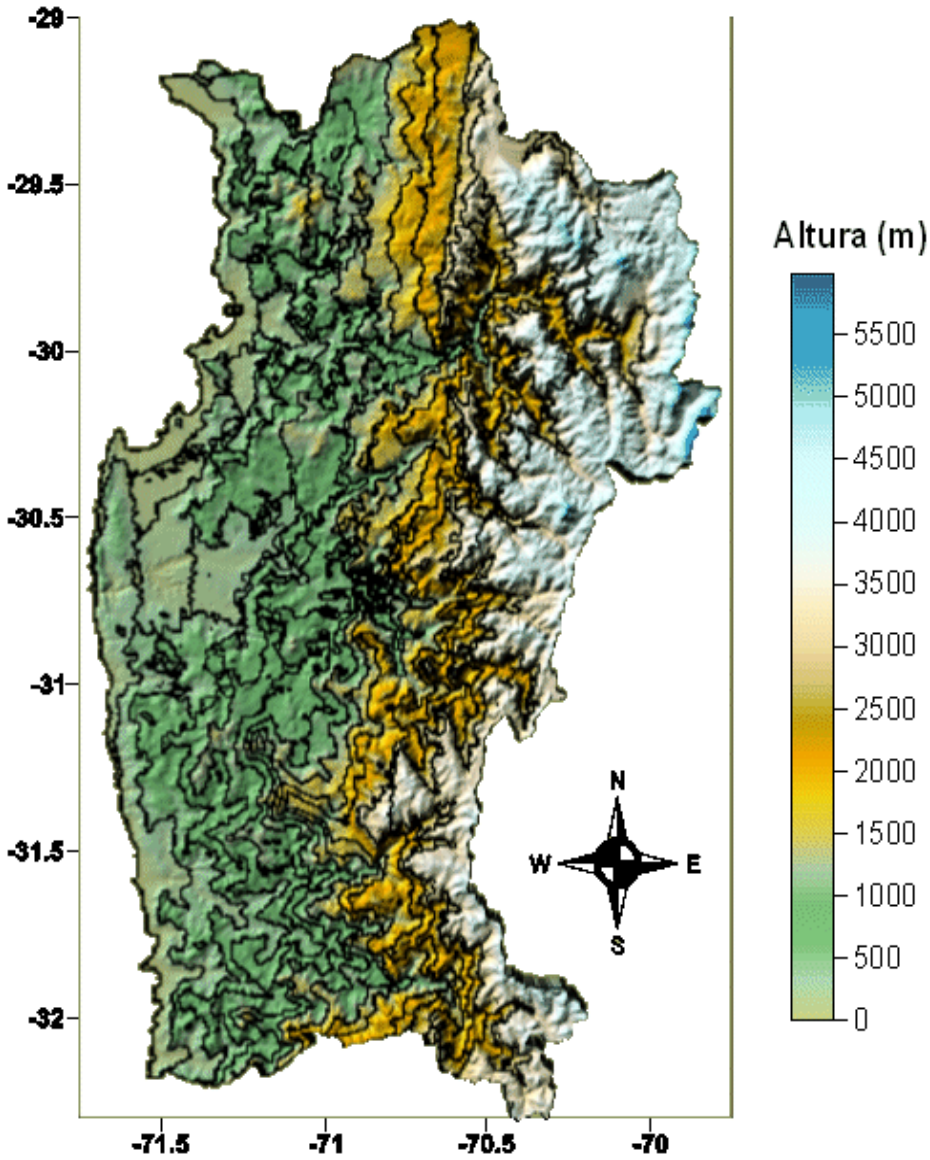


Figura 7. Zonificacion Topoclimática sobre modelo digital de elevaciones (MDE).
Figure 7. Topoclimatic Classification over digital elevation model (DEM).

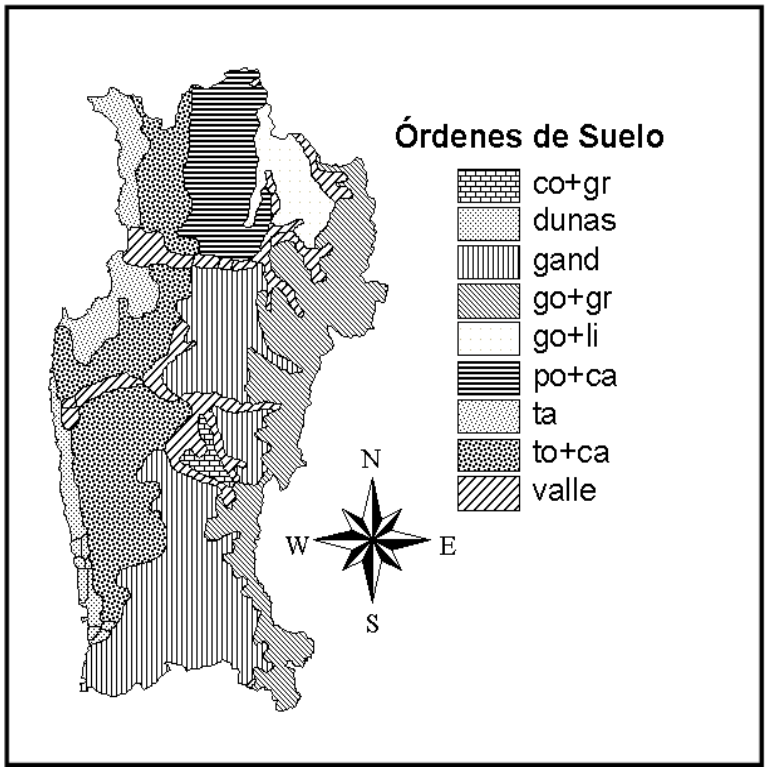


Figura 8. Clasificación de los suelos de la IV Región.
Figure 8. Soil classification from IV Region.

Cuadro 4: Códigos empleados en la clasificación de los suelos de la IV Región.

Table 4: Code used for the soils classification of the IV Region.

Código	Orden	Suborden	Gran grupo	SubGrupo
CAxo	ARIDISOLS	ORTHIDS	CAMBORTHIDS	XEROLLIC
CO	ENTISOLS	ORTHENTS	CRYORTHENTS	
+				
CR	INCEPTISOLS	OCHREPTS	CRYOCHREPTS	
CO	ENTISOLS	ORTHENTS	CRYORTHENTS	TEPIC –
+				ANDEPTIC –
LI	ENTISOLS	ORTHENTS	CRYORTHENTS	PERGELIC
				LITHIC
PO	ARIDISOLS	ORTHIDS	PALEORTHIDS	
+				
CA	ARIDISOLS	ORTHIDS	CAMBORTHIDS	
TO	ENTISOLS	ORTHENTS	TORRIORTHENTS	
+				
CA	ARIDISOLS	ORTHIDS	CAMBORTHIDS	
TR	ENTISOLS	PSAMMENTS	TORRIPSAMMENTS	DUROR THIDIC – TYPIC – LITHIC

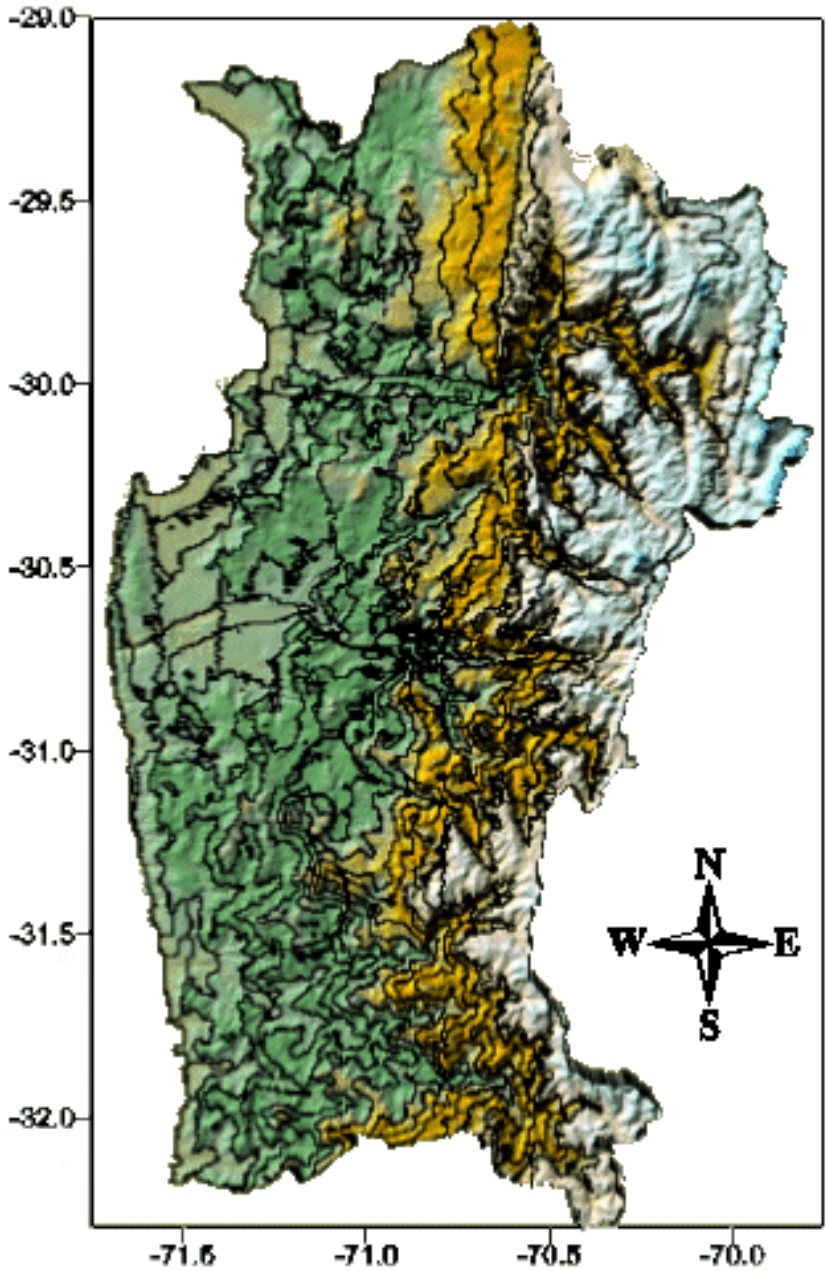
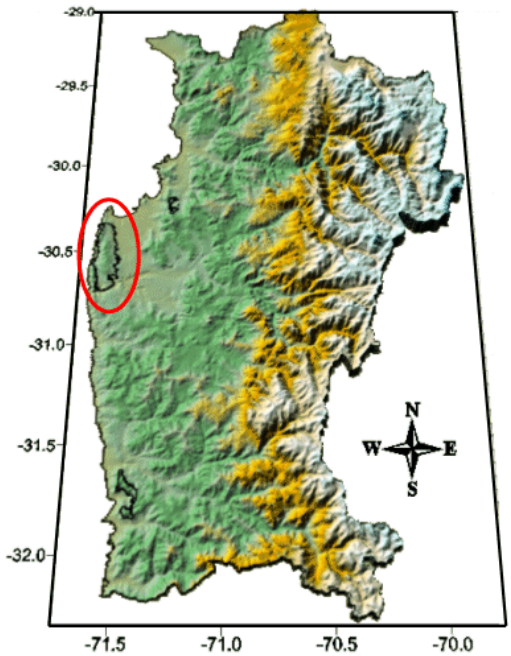


Figura 9. Clasificación Edafoclimática en líneas sobre un modelo digital de terreno del área de estudio, los colores corresponden a altura en metros.
Figure 9. Edafoclimatic Classification in lines over a digital terrain model of the study area, the colors are altitude in meters.



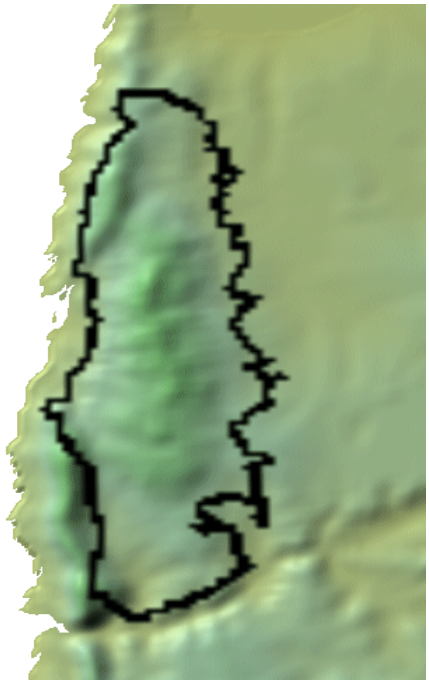


Figura 10: (a) Ejemplo de distrito edafoclimático. (b) Zoom del mismo distrito edafoclimático.
Figure 10: (a) Example of Edafoclimatic district. (b) Zoom to the same edafoclimatic district.

Cuadro 5: Características climáticas del distrito presentado en el ejemplo (a) mensuales y (b) anuales, donde IH corresponde a Índice de Humedad, PLH a Período libre de heladas, HFA a Horas de frío anuales, EHI a Excedente hídrico invernal, DHE a Déficit hídrico estival, PS a Período seco, PH a Período húmedo, TNJ a Temperatura mínima media de Julio, TXE a temperatura máxima media de Enero. (c) Características del tipo de suelo que se encuentra en el distrito de ejemplo.

Table 5: Climatic characteristics of the example district (a) monthly and (b) annually, where IH is Humidity Index, PLH free frost period, HFA Annual Cold Hours, EHI Winter Hydric excedent, DHE Summer Hydric Deficit, PS Dry Period, PH Humid Period, TNJ minimum mean temperature for July and TXE maximum mean temperature for January. (c) Soil characteristics of the edafoclimatic example district.

(a) Características climáticas mensuales

Variable	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T° media	°C	19,62	19,06	17,56	15,47	13,39	11,89	11,4	12,06	13,63	15,79	17,84	19,23
Rad. Solar	MJ m^{-2}	24,06	21,24	15,85	11,81	8,23	6,6	7,25	10,03	14,02	18,68	22,16	23,84
Días-Grados	D-G	312,61	275,97	246,09	178,87	115,89	75,09	51,34	73,71	123,54	197,03	256,57	309,94
Pp	mm	0,24	0,15	1,03	3,82	12,73	26,58	33,94	18,25	6,24	2,58	0,93	0,2
ETP	mm	120,84	96,39	79,6	57,43	41,34	32,08	36,4	50,39	69,01	93,83	107,73	119,74
IH	Adim	0	0	0,01	0,07	0,31	0,84	0,94	0,36	0,09	0,03	0,01	0
Horas Frío	Hrs	0	0	0,45	13,26	49,77	95,77	114,72	89,76	43,04	10,06	0,07	0

(b) Características climáticas anuales

PLH	HFA	EHI	DHE	PS	PH	TNJ	TXE
365	416,8	-40,09	-336,37	10,12	0,76	6,00	25,24

(c) Características de suelo

Orden	Erosión	Prof.	Drenaje	Densidad aparente	Pendiente
Entisol-Aridisol	Sin erosión	Delgado 25 a 50 cm.	Moderado	1,4	10 a 15%

métodos de interpolación de variables distribuidas espacialmente, tales como interpolación lineal (Canessa, 2006). El método de regresión espacial global topoclimático permite cuantificar los efectos físicos de la cercanía a los cuerpos de agua, variación altitudinal, así como una primera aproximación al efecto orográfico en la distribución espacial de precipitaciones. Con este método de especialización se obtuvieron errores cuadráticos medios del orden de 3º C menos en cuanto a temperaturas y entre 4 a 20 mm. en precipitación con respecto a el método de espacialización en base a interpolación lineal de isoyetas. Por otra parte, este método es susceptible de ser mejorado mediante la aplicación de regresiones locales (Fotheringham *et al*, 2000), ya que este método considera la no estacionaridad espacial de las relaciones descritas mediante los modelos de regresión. Investigaciones preliminares en tales efectos demuestran una mejora con su aplicación (Páez *et al*, 2003).

Por otro lado, los métodos de análisis multivariante de cluster y la tabulación cruzada, permiten un mejoramiento en cuanto a los niveles de precisión en la especialización edafoclimática respecto de otros métodos de agrupación espacial. Este método puede ser mejorado utilizando información más detallada, tanto desde el punto de vista de las estaciones meteorológicas, como de la cartografía de suelos.

CONCLUSIONES

A través de la técnica empleada de análisis multivariado de *clusters*, es posible aumentar el grado de precisión de la zonificación y el número de distritos identificados por sobre los métodos convencionales. Además la zonificación realizada considera las características topográficas en el trazado de los distritos, a diferencia de técnicas anteriores en las cuales se producían errores en el trazado manual de estos mismos o de variables climatológicas utilizadas como base para estudios similares.

Los parámetros térmicos y energéticos presentan un comportamiento y distribución espacial en directa relación con las variaciones macro y microtopográficas. Este hecho se debe a que los principales factores determinantes de las características termoclimáticas son el gradiente altitudinal que se experimenta en la región y el efecto moderador del océano y otros cuerpos de agua, como los mayores embalses. Por otro lado los parámetros hídricos presentan un nivel de relación menor en su comportamiento y distribución espacial con variables microtopográficas dependiendo fundamentalmente de la posición latitudinal y longitudinal.

La clasificación edafoclimática realizada sólo considera una cartografía de ordenes de suelos, lo cual es una información gruesa para la escala de trabajo. Es importante destacar que el método permite llegar a niveles de resolución mejores utilizando información de edáfica más precisa, de mayor resolución y en definitiva mejor calidad.

La base de datos utilizada presenta importantes falencias tecnológicas, tales como la ubicación de las estaciones meteorológicas, las cuales se concentran en zonas bajo los 1.500 m.s.n.m. y en los valles transversales principales, existiendo áreas no cubiertas, principalmente al norte de la Región. Otro aspecto importante es la inconsistencia en los datos generados por éstas estaciones, los cuales se deben a errores tecnológicos como la no actualización de los sensores, el manejo de estos y la relocalización de la estaciones. A pesar de todas estas debilidades en la información base, el método de clasificación edafotopoclimática presenta resultados consistentes con la realidad del área de estudio.

Una posible mejora en el método de clasificación edafotopoclimática con el fin de detectar de manera aún más precisa formas microclimáticas, es utilizar modelos digitales de elevación con resoluciones altas y una mejor distribución y calidad de estaciones meteorológicas, así como las herramientas de hardware necesarias para procesar las altas concentraciones de datos que estas implicarían.

BIBLIOGRAFÍA

AMIGO, J y RAMIREZ, C. 1998. A Bioclimatic classification of Chile: woodland communities in the temperate zone. Plant Ecology 136: 9-26.

BAGNOULS, F y GAUSSEN, H. 1957. Les climats biologiques et leur classification. Annales de Géographie 355: 193-220.

BARRY, R. y CHORLEY, R. 1998. Atmosphere, Weather and climate. Londres, Routledge, 441p.

CALDENTEY, J. y PIZARRO J. 1980. Evaluación y zonificación de los recursos climáticos de la IV Región de Chile. Memoria (Ingeniero Forestal). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, 197 p.

CANESSA, F. 2006. Evaluación de los recursos climáticos de la IV Región de Coquimbo, mediante la utilización de Topoclimatología e imágenes NOAA-AVHRR. Memoria (Ingeniero en Recursos Naturales Renovables). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Cs. Agronómicas, 178 p.

CARSTENSEN, L.W., 1987. A Measure of Similarity for Cellular Maps, The American Cartographer, 14, 4, 345-358.

CHUVIECO, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. 3era edición, Madrid, Rialp, 568 p.

DI CASTRI, F y HAJEK, G. 1961. Índices pluviométricos para una clasificación del país en zonas bioclimáticas. En: CONVENCION NACIONAL de médicos veterinarios (4º, 1961, Santiago, Chile), Santiago, Chile.

DOBSON, A. 1990. An Introduction to Generalized Linear Models. London. Chapman and Hall.

EASTMAN, J. R. 1999. Idrisi 32 Guide to GIS and Image Processing Volume 1. Clark Labs Clark University. Worcester, Massachusetts, USA. 193 pp.

EASTMAN, J. R. 1999b. Idrisi 32 Guide to GIS and Image Processing Volume 2. Clark Labs Clark University. Worcester, Massachusetts, USA. 169 pp.

EROS. Earth resources observation and Science. http://edcsns17.cr.usgs.gov/earthexplorer

FAO. 1985. Datos agroclimatológicos para América latina y el caribe. Colección FAO, Producción y Protección vegetal Nº 24, Roma, Italia.

FOTHERINGHAM, A., BRUNDSON, C. y CHARLTON, M. 2000. Quantitative Geography. London. SAGE Publications. 270 pp.

FUSCO L., Y MUIRHEAD K. 1987. AVHRR Data Services in Europe - The Earthnet Approach, ESA Bulletin(49): 9-19.

IHL, M. 1991. Cambios climáticos y patrones locales de los climas del norte chico usando imágenes NOAA/AVHRR. Tesis (Magíster en Geografía). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 227p.

IQBAL, M. 1983. An introduction to solar radiation. Academic Press. Toronto, Canadá. 390 p.

INZUNZA, J. 2000. Meteorología descriptiva y aplicaciones en Chile. Universidad de Concepción, Concepción. Chile http://www.udec.cl/~jinzunza/meteo/cap1.pdf

KAMINSKI, A. y RADOSZ, J. 2003. Topoclimatic mapping on 1:50000 scale, of the map sheet of Bytom. http://www.geo.uni.lodz.pl/~icuc5/text/P_8_1.pdf

KOEPPEN, W. 1948. Climatología. México. Fondo de cultura económica. 478 p.

KRIGE, D. 1966. Two dimensional Weighted Moving Averages Surfaces for Ore Evaluation. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy. 66: 13-38.

LUZIO, W., 1992, Suelos de las zonas áridas y semiáridas, En: Departamento de ingeniería y suelos (Eds), en Suelos, una visión actualizada del recurso, publicaciones misceláneas agrícolas, Nº 38, 13-15.

LUZIO W., 1986, Génesis y clasificación de los suelos de regiones áridas y desérticas de Chile, Sociedad Chilena de las Ciencias del Suelo. Boletín Nº 5(1): 1 – 28.

MATUS, F., RODRÍGUEZ, J., PINOCHET, D. 2005. Soil Fertility; a rational method of interpretation. Workshop of 9th International Symposium of soil and plant analysis, Enero 30 -Febrero 4, Cancún, Mexico,89 p.

MC. MILLIN, L.1975. Estimation of sea surface temperatura from two infrared window measurements with different obsortion. J Geophys. Res. 36:5113-5117.
NOAA, 2000. KLM user's guide. http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/.

NOVOA S. A., R.; VILLASECA C., S.; DEL CANTO S., P; ROUANET M., J. L.; SIERRA B. C; DEL POZO L. A., 1989. Mapa Agroclimático de Chile. 60pp.

RAHMAN, H. y DEDIEU, G. 1994. SMAC: A simplified method for the Atmospheric Correction of satellite measurements in the solar spectrum.International Journal of Remote Sensing. 15(1):123-143

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). 2003, Manual on the Global Observing System, Volumen 1, N° 544. Ginebra, Suiza. 51 p.

ORD, J. 1975. Estimation methods for Models of Spatial Interaction.. Journal of the American Statistical Association. 70: 120-6.

PAEZ, A. ; KAWAY, K.; VICHIENSAN, V.; MIYAMOTO, K. 2003. Nonstationarity in regression-based spatial interpolation models.http://sciwebserver.science.mcmaster.ca/~paezha/Publications/Working_Papers/Spatial_Interpolation_v1.3__Publish_.pdf

PEREZ, C. 2004. Técnicas de análisis multivariante de datos, Aplicaciones con SPSS. Madrid, Pearson Educación. 672 pp.

QIYAO, L., JINGMING, Y. , BAOPU, F. 1991. A method of agrotopoclimatic division and its practice in China. International Journal of Climatology. 11: 86-96.

SANTIBAÑEZ, F Y URBIE, J. Atlas agroclimático de Chile: Regiones IV a IX. Universidad de Chile, Santiago, Chile.1993. 64 pp.

SAAVEDRA, N., MÜLLER E. AND FOPPIANO, J. 2002. Monthly mean rainfall frequency model for the central Chilean coast: Some climatic inferences. International Journal of Climatology. 22: 1495 – 1509.

SEYFRIED MARK. 2003. Subrutina computacional PINSOL. Agricultural Research Service (ARS)- USDA. Northwest Watershed Research Center (NWRC), Comunicación personal.

SHANNON, E. 1988. Simulación de sistemas. Diseño, desarrollo e implementación. Editorial Trillas, México DF. 427 p.

THORNTHWAITE, C. 1948. An approach toward a rational clasification of the climate. The Geographical Review. 38 (1): 55-94.

TONIETTO, J. Y CARBONNEAU, A. 2002. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. Agricultural and Forest Meteorology. 124: 81-97.

TONIETTO, J. 2005. El Uso de la Zonificación Vinícola Para Mejorar los Factores Agronómicos y Ecológicos Para Obtener Vinos de Calidad. En: Seminario Internacional de Vitivinícultura (2°, 2005, Ensenada, México). Ensenada, México.