

VALORACIÓN DE LA APTITUD VEGETAL PARA LA APICULTURA ORGÁNICA

ASSESSMENT OF VEGETATION APTITUDE TO ORGANIC BEEKEEPING

Sr. Marco A. Peña¹ y Sr. Diego Arce Zegers²

RESUMEN

La aptitud que presenta la vegetación del territorio para acoger la apicultura orgánica fue evaluada al interior del Santuario Apícola Paz de Aculeo, localizado en la Región Metropolitana de Chile, mediante el diseño de una metodología de evaluación multicriterio que combina herramientas de geomática y teledetección. Para esto, variables vegetales críticas para la selección de forraje por parte de las poblaciones de abejas fueron valoradas sobre las principales unidades vegetacionales que se encuentran catastradas en el área de estudio, para luego someterlas a una combinación lineal que hipotetizó varios escenarios de ponderación. Lo anterior, permitió clasificar las unidades de acuerdo a su aptitud para acoger la apicultura, siendo caracterizadas luego, de acuerdo a su vigor vegetal a largo del ciclo fenológico; derivado de composiciones de NDVI (*normalized difference vegetation index*), así como de su variabilidad topográfica; derivada de un DEM (*digital elevation model*). Los resultados muestran que las unidades vegetacionales del área de estudio pueden ser divididas en cinco clases de aptitud, independiente del escenario supuesto, siendo las clases de mejor aptitud (1 y 2) las más predominantes; distribuidas en terrenos de variable altitud, por lo general de exposición sureste. Si bien el NDVI compuesto arrojó diferencias entre las clases, estas fueron menores y no significativas según un análisis de varianza. Este estudio busca aproximar la gestión y planificación del sistema productivo apícola nacional de escala local al uso de geotecnologías. Futuros esfuerzos podrían aplicar una metodología similar sobre áreas vegetacionalmente más complejas y heterogéneas, con el sentido de probar su versatilidad.

Palabras clave: apicultura, aptitud territorial, NDVI, imágenes Landsat.

ABSTRACT

The aptitude offered by land vegetation to accommodate organic beekeeping was assessed in the Santuario Apícola Paz de Aculeo, located in the Metropolitan Region of Chile. A multicriteria analysis methodology combining geomatics and remote sensing was designed. For this purpose, critical vegetation variables for forage selection by the bee populations were valued on the main vegetation units cadastrated for the study area. Thereafter, they were subject to a lineal combination that hypothesized several weighting scenarios. The afore-mentioned enabled to classify the units according to their aptitude to accommodate the beekeeping, which were further characterized according to their vegetation vigor throughout the phenological cycle; derived from NDVI (normalized difference vegetation index) composites, as well as to their topographic variability; derived from a DEM (digital elevation model). The results show that no matter the scenario supposed, the vegetation units of the study area can be divided into five aptitude classes, with those embracing the highest aptitude (1 and 2) as the most prevailing; being distributed at variable altitudes of generally southwest aspect. Although the NDVI composites yielded differences between classes, those were small and non-significant, as a variance analysis pointed out. This study seeks to approximate the management and planning of the beekeeping productive system of local scale to the geotechnologies usage. Further efforts could apply a similar methodology on more complex and heterogeneous vegetation areas with the aim of proving its versatility.

Keywords: beekeeping, land aptitude, NDVI, Landsat images.

¹ Departamento de Geografía, Universidad Alberto Hurtado. mapena@uahurtado.cl

² Departamento de Geografía, Universidad Alberto Hurtado.

INTRODUCCIÓN

La apicultura orgánica es un sistema de producción pecuario que busca desarrollarse de forma sustentable y armónica en el medio ambiente, por lo que además de usar métodos y materiales naturales de producción, requiere de un profundo conocimiento y manejo no invasivo de los ecosistemas locales en que se asienta (Fuentes, 2016). Lo anterior, resulta determinante en el desarrollo de esta actividad y en el valor agregado de sus productos; favoreciendo la salubridad de las colmenas y el valor nutricional de los variados productos generados, posibilitando en consecuencia, certificaciones y nuevos mercados comerciales (Mariani, 2020; Vandame *et al.*, 2012). Dentro de los factores relevantes para desarrollar la práctica apícola orgánica en Chile, destaca la disponibilidad e idoneidad de flora como suministro de recursos productivos y forrajeros (Lagos, 2017). Esto torna necesario desarrollar métodos que permitan identificar eficientemente la idoneidad de la vegetación de un territorio para acoger esta actividad, incrementando la valía y competitividad del sistema productivo apícola nacional (Valdés, 2014).

A este respecto, las tecnologías y metodologías provistas por la geomática y la teledetección se erigen como herramientas innovadoras para la planificación y gestión de la actividad apícola, contribuyendo a identificar de manera automatizada aquellas unidades territoriales aptas para acogerla. Así, por ejemplo, la combinación de mediciones de campo de variables de la colmena, como su peso y productividad, con mapas temáticos de abundancia, tipo y fenología de flora apícola; derivada de índices espectrales de verdor vegetal, ha permitido precisar las variaciones espaciotemporales del flujo de néctar (Nightingale *et al.*, 2008). En esta línea, Adgaba *et al.* (2017), valiéndose de un conjunto de imágenes satelitales adquiridas en distintas estaciones de un año, generaron una clasificación espectral que les permitió orientar la valoración de aptitud apícola de las especies vegetales empleadas por las poblaciones de abejas como forraje, contribuyendo con ello a la selección más eficiente de sitios de uso apícola y su reasentamiento oportunista de acuerdo con la fenología vegetal.

Cuando la identificación de territorios aptos para acoger la actividad apícola involucra un mayor número de criterios o variables; muchas difíciles de

cuantificar y objetivar, las aproximaciones metodológicas se han basado comúnmente en lógicas de evaluación multicriterio (Maris *et al.*, 2008; Estoque y Murayama, 2010; Amiri y Shariff, 2012).

Si bien éstas son útiles para asistir tomas de decisiones complejas sobre el territorio, la subjetividad en la ponderación de variables (llevada a cabo por parte de expertos), así como la combinación de variables de diversa naturaleza (e.g., físicas y humanas) mediante su estandarización lineal, son usualmente consignadas como sus principales limitantes metodológicas. Zocalli *et al.*, (2017) valoraron la aptitud territorial para uso apícola aplicando una metodología de lógica borrosa sobre las variables temperatura, composición vegetal, altitud y cercanía a las redes hidrográficas y vial, permitiéndoles obtener un mapa de aptitud más preciso y objetivo. Sari *et al.*, (2020) por su parte, complementaron la evaluación multicriterio de aptitud de uso apícola con un calendario de producción espacializado que precisa las dinámicas fenológicas de la vegetación, obtenidas del procesamiento de imágenes satelitales y estudios de campo, contribuyendo con ello a identificar temporadas de producción para la localización de colmenas.

Serrano *et al.* (2008) diseñaron un *web mapping* que vinculó las condiciones medioambientales, la localización de los apiarios y las características fisicoquímicas de la miel, permitiendo con ello visualizar fuentes de néctar específico y facilitar la selección de áreas para los procesos de producción de miel con denominación de origen. De forma similar, en Chile la Fundación para la Innovación Agraria (2009) desarrolló un instrumento que facilita a los apicultores locales determinar pautas de manejo y distribución de los apiarios en función de áreas georreferenciadas de vegetación apícola y su potencialidad según capacidad de carga obtenida de parcelas representativas.

En este estudio combinamos herramientas de geomática y teledetección con aproximaciones metodológicas multicriterio para valorar territorios vegetacionalmente idóneos para el emplazamiento de la actividad apícola al interior del Santuario Apícola Paz de Aculeo, Región Metropolitana de Chile, donde esta actividad representa la mayor concentración a escala nacional (SAG, 2020). Para esto, fueron empleadas capas temáticas del área

de estudio que caracterizan sus principales unidades vegetacionales de acuerdo a tres variables críticas para la selección de forraje por parte de las poblaciones de abejas: preferencia de especie, dominancia de la especie y grado de cobertura vegetal de la unidad. La aptitud de estas unidades para acoger la actividad en cuestión fue valorada empleando una combinación lineal ponderada, siendo caracterizadas luego de acuerdo a sus comportamientos temporales de NDVI (*normalized difference vegetation index*), derivados de imágenes satelitales Landsat-8 y empleados como indicadores del estado de vigorosidad de las unidades vegetacionales a lo largo de su ciclo fenológico (Jones y Vaughan, 2010).

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO.

El área de estudio corresponde al Santuario Apícola Paz de Aculeo (33°49'34" S - 70°54'46" O), ubicado en los faldeos del cerro Culiprán, en la localidad de Pintué, comuna de Paine de la Región Metropolitana de Chile (Figura 1).

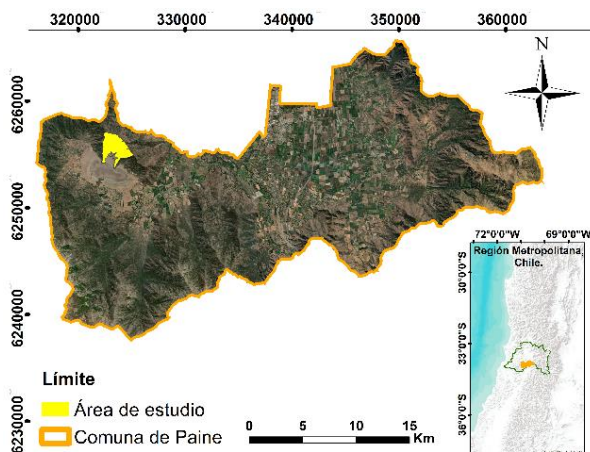


Figura 1. Localización del área de estudio correspondiente al Santuario Apícola Paz de Aculeo, comuna de Paine, Región Metropolitana de Chile.

El clima es de tipo mediterráneo pluviestacional, con una fuerte estacionalidad que concentra precipitaciones en invierno y un periodo árido en verano. La precipitación anual es de 527 mm, mientras que la temperatura media alcanza los 13,3 C°. Los meses más húmedos se concentran entre

Mayo y Agosto; y los áridos entre Noviembre y Marzo (Luebert y Pliscoff, 2006).

Las cadenas montañosas producen la elevación de masas de aire cargadas de humedad provenientes del Océano Pacífico, generando un efecto de sombra de lluvias manifestado en altos montos de precipitación en la vertiente occidental y las cumbres de las cordilleras de la Costa y de Los Andes (Luebert y Pliscoff, 2006). Este efecto ocurre particularmente en el área de estudio (~400 msnm), ubicada en la vertiente oriental de la cordillera de la Costa a 17 km aproximadamente de Altos de Cantillana (2300 msnm); una de las cumbres de mayor altitud de la Cordillera de La Costa.

Las formaciones vegetales se definen a partir de la fisonomía de las especies dominantes, que para el caso del área de estudio es del tipo esclerófila. El piso de vegetación corresponde al Bosque esclerófilo Mediterráneo Andino de *Quillaja saponaria* (Quillay) y *Lithraea caustica* (Litre) (Luebert y Pliscoff, 2006).

MATERIALES.

El trabajo empleó capas temáticas vectoriales e imágenes ópticas satelitales. El primer material se obtuvo del Catastro de Uso de Suelo y Vegetación

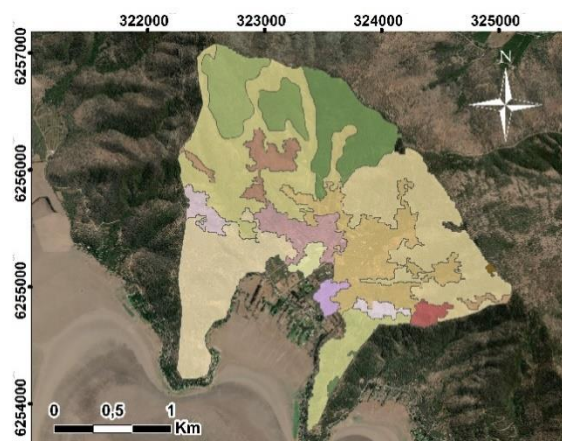


Figura 2. Unidades vegetacionales del área de estudio, definidas a partir de su composición y estructura. Fuente: CONAF (2013).

realizado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2013) y descargado del portal en línea de Infraestructura de Datos Espaciales de Chile, perteneciente al Ministerio de Bienes Nacionales

(<http://www.ide.cl/index.php>). Este producto vectorial provee una rodalización de la vegetación del área de interés según sus atributos de composición y estructura (ver IDE 2018 para más detalles metodológicos), resultando en una desagregación del área en 20 unidades vegetacionales (Figura 2). Si bien tal rodalización no ha sido recientemente actualizada, sus cambios en un lapso de tiempo tan breve sobre un área que no ha estado sujeta a disturbios apreciables desde el relevamiento de esa información, se consideraron despreciables para los propósitos de este estudio.

El segundo material empleado corresponde a cuatro imágenes ópticas Landsat-8, descargadas del portal en línea del Servicio Geológico de EE.UU. (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Éstas cuentan con una resolución espacial nominal de 30 m y fueron adquiridas en Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre de 2018, meses donde se alcanza una óptima productividad según los apicultores del área de estudio y el análisis melisopalinológico de la zona (Montenegro, 1989). El nivel de procesamiento de las imágenes corresponde al producto L1TP (*Level-1 Terrain Precision*), es decir, han sido sujetas a calibración radiométrica y ortorectificación, por lo que para su empleo en este estudio sólo requirieron de la obtención de reflectancias superficiales de píxel. Esto fue realizado usando el corrector atmosférico FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes*) de ENVI (*ENvironment for Visualizing Images*) 5.3©, que modela la propagación de radiación óptica a lo largo de la columna atmosférica mediante el código MODTRAN© (*MODerate resolution atmospheric TRANsmision*).

MÉTODOS.

La preferencia de las poblaciones de abejas por determinadas especies ha sido ampliamente analizada en estudios etológicos de *Apis mellifera* (May y Rodríguez, 2012; Amaya, 2009; Rodríguez y Velásquez, 2011; Rallo, 1987; Solorzano y Licata, 2012; Insuasty *et al.*, 2015) así como también en análisis melisopalinológicos de sus productos melíferos (Severson y Parry, 1981; Andrada, 2003; Andrada *et al.*, 2004; Montenegro, 1989, 2004; Fagúndez, 2011). Lo anterior ha permitido establecer que la selectividad de forraje de las poblaciones de abejas atiende primordialmente al grado de cobertura o abundancia de las especies

vegetales que proveen los recursos polen-nectaríferos de mayor calidad para satisfacer el requerimiento energético de las colmenas. Si bien, otros factores como morfología y coloración de la flor (Andrada *et al.*, 2004 Amaya, 2009), distancia a las fuentes de alimento (Rallo, 1987), o características fisicoquímicas de los recursos polen-nectaríferos (Montenegro, 2004) también han sido consignados como criterios de selección alimentaria por parte del insecto.

Consecuentemente, las unidades vegetacionales del área de estudio fueron valoradas y ponderadas de acuerdo a tres variables relevantes: preferencia de especie, dominancia de la especie y grado de cobertura vegetal de la unidad, para luego someterlas a una combinación lineal ponderada (WLC, *Weighted Linear Combination*). Este método multicriterio parte trasladando una valorización ordinal inicialmente asignada a las categorías de cada variable de interés a un rango numérico común normalizado. Posteriormente, asigna una ponderación a cada variable, la que es aplicada a la sumatoria de sus categorías, permitiendo con ello derivar un mapa de adecuación o aptitud del territorio de escala continua (Eastman, 2012).

De esta manera, las categorías nominales de la variable preferencia de especie de cada unidad vegetacional fueron agrupadas y valorizadas en una escala de 1 a 3, en atención al estudio melisopalinológico de Montenegro (2004) aplicado al bosque esclerófilo chileno y a la información proporcionada por los apicultores del área de estudio. En tanto, la valorización de las categorías de las variables grado de cobertura vegetal de la unidad y dominancia de la especie siguió su orden lógico original.

Una vez valorizadas las categorías de las variables, éstas fueron normalizadas en un rango entre 0 y 1, en que, a mayor valor, mejor aptitud apícola del territorio. La fórmula empleada fue la siguiente:

Ecuación 1

$$X_z = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

Donde,

X_i = valor ordinal dado de la variable a normalizar.

X_{\max} = valor ordinal máximo de la variable a normalizar.

X_{\min} = valor mínimo absoluto (0) de la variable a normalizar.

Posteriormente, sobre los valores normalizados de cada categoría se aplicó la WLC:

Ecuación 2

$$WLC = \sum W_i X_i$$

Donde,

W_i = peso de ponderación de una variable dada.

X_i = valor de la categoría de una variable dada.

Dado que cada unidad vegetacional presenta seis especies con distinta preferencia por parte de las abejas, así como una distinta dominancia, fue necesario promediar seis WLCs para obtener el valor de aptitud para la actividad apícola de la unidad en cuestión.

Con el sentido de analizar distintos escenarios de aptitud, fueron aplicadas cuatro ponderaciones distintas sobre las variables de interés; la primera, asignó idéntica ponderación a cada una de éstas (0,33), en tanto que en las otras tres fue permutado un valor de ponderación alto para una variable (0,7) y uno bajo para los dos restantes (0,15 cada una). El resumen de los métodos descritos es presentado en la Tabla 1.

Variable	Categoría	Valor					
		#	z	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄
Preferencia de especie	<i>Q. saponaria</i>						
	<i>L. caustica</i>						
	<i>C. alba</i>						
	<i>T. trinervis</i>						
	<i>P. boldus</i>	3	1	0,33	0,70	0,15	0,15
	<i>C. odorifera</i>						
	<i>K. oblonga</i>						
	<i>S. latifolius</i>	2	0,66				
	<i>A. caven</i>						
Grado de cobertura de la unidad	<i>C. chilensis</i>	1	0,33				
	Denso	4	1				
	Semidenso	3	0,75	0,33	0,15	0,70	0,15
	Abierto	2	0,5				
Dominancia de la especie	Muy abierto	1	0,25				
	1°	6	1				
	2°	5	0,83				
	3°	4	0,66	0,33	0,15	0,15	0,70
	4°	3	0,5				
	5°	2	0,33				
	6°	1	0,16				

Tabla 1. Valorización (#), normalización (z) y escenario de ponderación ($W_1...W_n$) de las variables: preferencia de especie, dominancia de la especie y grado de cobertura vegetal, en cada unidad vegetacional del área de estudio.

CREACIÓN DE IMÁGENES COMPUESTAS DE NDVI.

Desde cada imagen Landsat-8 fue calculado el índice espectral de verdor vegetal NDVI, que combina aritméticamente el comportamiento espectral de la vegetación en las bandas del rojo e infrarrojo cercano, proveyendo con ello una medida adimensional de su estado de vigor; que aumentará cuanto mayor sea la reflectividad medida en el infrarrojo cercano (a causa de la reflexión del follaje sano) y menor sea la reflectividad medida en el rojo (a causa de la absorción de la clorofila foliar) (Jones y Vaughan, 2010). Su formulación es la siguiente:

Ecuación 3

$$NDVI = (\rho_{IC} - \rho_R) / (\rho_{IC} + \rho_R)$$

Donde,

ρ_{IC} = reflectancia en la banda del infrarrojo cercano de la imagen Landsat (0,85–0,89 μ m).

ρ_R = reflectancia en la banda del rojo de la imagen Landsat (0,63–0,68 μ m).

Los valores resultantes se distribuyen en una escala de -1 a 1, siendo aquellos positivos indicativos de píxeles con presencia de vegetación; la que será tanto más vigorosa cuanto más se aproxime a 1. Los valores inferiores a 0 en tanto, corresponden a otras coberturas, como suelo desnudo o cuerpos de agua.

Estos cuatro índices fueron compuestos, es decir, agregados en una única imagen, para ser empleados como *proxy* de la dinámica fenológica de la vegetación del área de estudio. Para tal efecto, fueron realizadas dos tipos de composiciones: NDVI máximo y NDVI promedio. La primera, resultó de aplicar la siguiente fórmula:

Ecuación 4

$$NDVI_{max} = NDVI_{t1} > NDVI_{t2} > NDVI_{t3} > NDVI_{t4}$$

Donde,

$t_1 \dots t_n$ corresponde a la fecha de adquisición de una imagen.

La segunda en tanto resultó de un promedio simple de las cuatro imágenes de NDVI creadas.

CARACTERIZACIÓN DE VIGOR TEMPORAL DE LAS UNIDADES VEGETACIONALES.

Para cada una de las unidades vegetacionales del área de estudio fue calculado el promedio de cada NDVI compuesto, permitiendo con esto complementar la valoración de su idoneidad para acoger la actividad apícola en términos del estado de vigor resultante de su dinámica fenológica.

CARACTERIZACIÓN TOPOGRÁFICAS DE LAS UNIDADES VEGETACIONALES.

Similarmente, sobre cada unidad vegetacional fue calculado el área, elevación y exposición del terreno, con el objeto de complementar la valoración de su idoneidad para acoger la actividad apícola, esta vez desde el punto de vista topográfico. Para esto fue empleado un Modelo Digital de Elevación (DEM, *digital elevation model*) ALOS-PALSAR (*Advanced Land Observation Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar Mission*), descargado desde el portal en línea *Alaska Satellite Facility* (<https://search.asf.alaska.edu/>), el que cuenta con una resolución espacial nominal de 15 m.

RESULTADOS

CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES VEGETACIONALES.

La valoración de las 20 unidades vegetacionales que componen al área de estudio, de acuerdo a las variables: preferencia de especie, dominancia de la especie y grado de cobertura vegetal de la unidad, permitió agruparlas en cinco clases con idéntico valor y, por lo tanto, con idénticos resultados en el promedio de las ponderaciones ($\bar{x}WLC$) arrojado para cada uno de los cuatro escenarios hipotetizados (W_1, \dots, W_4) (Tabla 2). Debido a esta consistencia, el presente trabajo presenta sólo un mapa de aptitud vegetal para la actividad apícola, que, por propósitos ilustrativos, representa el escenario más conservador de ponderación de las variables, *i.e.*, W_1 (Figura 3).

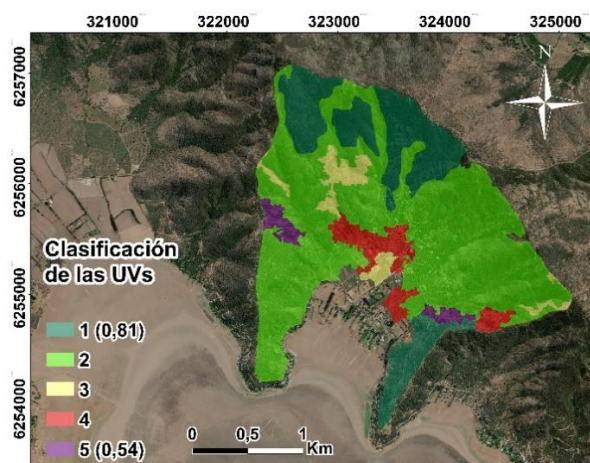


Figura 3. Clasificación de las unidades vegetacionales (UVs) del área de estudio a partir de los resultados arrojados por la valoración de las variables: preferencia de especie, dominancia de la especie y grado de cobertura vegetal de la unidad y su ponderación basada en un escenario conservador (W_1).

La Tabla 2 permite apreciar que las unidades vegetacionales de mayor aptitud apícola (clase 1) son aquellas que concentran cuatro especies de la más alta preferencia por parte de las abejas en los cuatro primeros puestos de dominancia, en tanto que las especies que ocupan los puestos de dominancia cinco y seis se alternan entre un valor de preferencia media y baja. Así, dado que todas estas unidades poseen una cobertura densa, su cifra de ponderación promediada ($\bar{x}WLC$) es idéntica. Esta clase es la segunda de mayor área, distribuyéndose predominantemente en torno a las mayores altitudes del área de estudio, caracterizadas por una exposición Sureste (Tabla 3), a excepción de una zona de baja altitud de exposición Suroeste correspondiente a una estribación del cerro en que se emplaza el área de estudio (Figura 3).

# Clase	Área (m ²)	$\bar{x}h$ (m)	$\bar{x}a$ (°)
1	106,1	616	147
2	297,8	549	130
3	22,6	627	118
4	28,7	449	177
5	11,9	501	123

Tabla 3. Caracterización topográfica (área, altitud promedio: $\bar{x}h$ y exposición promedio: $\bar{x}a$) de las clases de unidades vegetacionales del área de estudio.

La clase 2, al igual que la clase 1, concentra unidades vegetacionales con cuatro especies de la más alta preferencia por parte de las abejas en los cuatro primeros puestos de dominancia, en tanto que las especies que ocupan los puestos cinco y seis de dominancia se alternan entre un valor de preferencia media y baja. Como en el caso anterior, la cifra de ponderación promediada ($\bar{x}WLC$) de estas unidades vegetacionales también es idéntica, dado que poseen el mismo un grado de cobertura vegetal, que al ser semidenso las sitúa por debajo de la clase 1. Esta clase es la que alcanza una mayor área de las cinco, distribuyéndose a variables altitudes de exposición predominantemente Sureste.

Las clases 3 y 4 se componen de unidades vegetacionales con una similar valorización de las variables preferencia y dominancia de especie, salvo excepciones como las unidades 15 y 18, que concentran especies de la más alta preferencia por parte de las abejas sólo en los tres primeros puestos de dominancia, dejando los restantes puestos a especies de preferencia moderada, que terminan por arrojar el mismo resultado de ponderación promediada que las demás unidades de la clase. Por su parte, la unidad vegetacional 11, posee una composición de cinco especies, que hace que obtenga una ponderación promediada ligeramente superior que el resto de las unidades de su clase.

#UV	#Clase	Preferencia de especie/dominancia						Grado de cobertura	$\bar{x}WLC$				$\bar{x}NDVI$	
		1°	2°	3°	4°	5°	6°		W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	Promedio	Máximo
1		<i>P.b.</i>	<i>C.a.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>L.c.</i>	<i>C.o.</i>	<i>A.c.</i>	Denso	0,81	0,82	0,91	0,68	0,66	0,75
2		<i>P.b.</i>	<i>C.a.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>L.c.</i>	<i>C.o.</i>	<i>A.c.</i>	Denso	0,81	0,82	0,91	0,68	0,62	0,78
3		<i>P.b.</i>	<i>C.a.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>L.c.</i>	<i>C.o.</i>	<i>A.c.</i>	Denso	0,81	0,82	0,91	0,68	0,64	0,77
4		<i>P.b.</i>	<i>C.a.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>L.c.</i>	<i>C.o.</i>	<i>A.c.</i>	Denso	0,81	0,82	0,91	0,68	0,62	0,79
5	1	<i>Q.s.</i>	<i>L.c.</i>	<i>P.b.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>C.c.</i>	<i>C.o.</i>	Denso	0,81	0,82	0,91	0,68	0,62	0,74
6		<i>P.b.</i>	<i>C.a.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>L.c.</i>	<i>C.o.</i>	<i>A.c.</i>	Semidenso	0,72	0,78	0,74	0,65	0,62	0,75
7		<i>P.b.</i>	<i>C.a.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>L.c.</i>	<i>C.o.</i>	<i>A.c.</i>	Semidenso	0,72	0,78	0,74	0,65	0,65	0,77
8		<i>C.a.</i>	<i>L.c.</i>	<i>P.b.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>C.c.</i>	<i>C.o.</i>	Semidenso	0,72	0,78	0,74	0,65	0,66	0,80
9		<i>P.b.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>L.c.</i>	<i>C.a.</i>	<i>C.c.</i>	<i>C.o.</i>	Semidenso	0,72	0,78	0,74	0,65	0,66	0,80
10	2	<i>C.a.</i>	<i>L.c.</i>	<i>P.b.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>C.c.</i>	<i>C.o.</i>	Semidenso	0,72	0,78	0,74	0,65	0,67	0,76
11		<i>C.a.</i>	<i>P.b.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>L.c.</i>	<i>C.o.</i>		Abierto	0,68	0,82	0,58	0,64	0,63	0,74
12		<i>C.a.</i>	<i>L.c.</i>	<i>P.b.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>C.c.</i>	<i>C.o.</i>	Abierto	0,64	0,75	0,56	0,61	0,57	0,76
13		<i>C.a.</i>	<i>L.c.</i>	<i>P.b.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>C.c.</i>	<i>C.o.</i>	Abierto	0,64	0,75	0,56	0,61	0,63	0,73
14		<i>C.a.</i>	<i>L.c.</i>	<i>P.b.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>C.c.</i>	<i>C.o.</i>	Abierto	0,64	0,75	0,56	0,61	0,66	0,75
15	3	<i>Q.s.</i>	<i>T.t.</i>	<i>P.b.</i>	<i>S.l.</i>	<i>K.o.</i>	<i>C.o.</i>	Abierto	0,64	0,75	0,56	0,61	0,55	0,75
16		<i>C.a.</i>	<i>L.c.</i>	<i>P.b.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>C.c.</i>	<i>C.o.</i>	Muy abierto	0,56	0,71	0,39	0,57	0,67	0,76
17		<i>C.a.</i>	<i>L.c.</i>	<i>P.b.</i>	<i>Q.s.</i>	<i>C.c.</i>	<i>C.o.</i>	Muy abierto	0,56	0,71	0,39	0,57	0,68	0,78
18	4	<i>Q.s.</i>	<i>T.t.</i>	<i>P.b.</i>	<i>S.l.</i>	<i>K.o.</i>	<i>C.o.</i>	Muy abierto	0,56	0,71	0,39	0,57	0,66	0,75
19		<i>A.c.</i>	<i>T.t.</i>	<i>P.b.</i>	<i>C.o.</i>	<i>K.o.</i>	<i>Q.s.</i>	Muy abierto	0,54	0,67	0,38	0,56	0,69	0,81
20	5	<i>A.c.</i>	<i>T.t.</i>	<i>P.b.</i>	<i>C.o.</i>	<i>K.o.</i>	<i>Q.s.</i>	Muy abierto	0,54	0,67	0,38	0,56	0,63	0,74

Tabla 2. Clasificación de las unidades vegetacionales (UVs) del área de estudio a partir de las variables: preferencia de especie, dominancia de la especie y grado de cobertura vegetal de la unidad. Cada uno de los cuatro escenarios de aptitud vegetal generados para una unidad dada (W_1 , W_2 , W_3 y W_4) resultó de promediar seis sumas ponderadas ($\bar{x}WLC$); correspondientes a las seis especies presentes en dicha unidad. *P.b.*= *Peumus boldus*, *Q.s.*= *Quillaja saponaria*, *L.c.*= *Lithrea caustica*, *C.a.*= *Cryptocarya alba*, *C.o.*= *Colliguaja odorifera*, *A.c.*= *Acacia caven*, *T.t.*= *Trevoa trinervis*, *C.c.*= *Carica chilensis*, *K.o.*= *Kageneckia oblonga*, *S.l.*= *Schinus latifolius*. Cada unidad presenta sus valores promedio para los compuestos de $NDVI_{prom}$ y $NDVI_{max}$.

Finalmente, las unidades vegetacionales de la clase 5 concentran un valor de preferencia baja de la especie en el puesto de mayor dominancia, y un

valor de preferencia alta los puestos 2, 3 y 6. Las clases 3, 4 y 5 se caracterizan por presentar la menor área a lo largo de altitudes medias y bajas,

a excepción de las unidades vegetacionales 12 y 15 situadas a mayor altitud. La exposición promedio de estas clases es Sureste, no obstante, presenta unidades vegetacionales con exposición Suroeste y Noreste.

CARACTERIZACIÓN DEL VIGOR TEMPORAL DE LAS UNIDADES VEGETACIONALES.

En cuanto al comportamiento del NDVI temporal dentro de cada unidad vegetacional del área de estudio, la Tabla 2 permite apreciar que los promedios de ambas imágenes compuestas (*i.e.*, $NDVI_{prom}$ y $NDVI_{max}$) arrojaron similares valores a lo largo de las unidades, impidiendo distinguir diferencias claras que refinen la orientación de la actividad apícola dentro de determinada clase. En efecto, un análisis de varianza (ANOVA, *ANalysis of VAriance*) arrojó que no existen diferencias significativas entre las medias de las unidades vegetacionales para las cinco clases definidas, las cuales se encuentran muy próximas entre sí (dentro de un rango de ~ 0.1) (Figura 4).

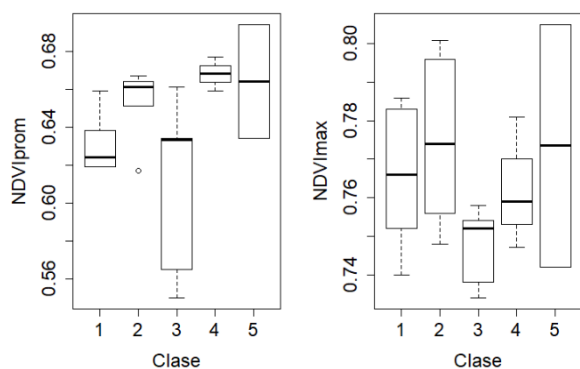


Figura 4. Diagramas de caja-bigote de $NDVI_{prom}$ (izquierda) y $NDVI_{max}$ (derecha) para las cinco clases de unidades vegetacionales definidas en el área de estudio.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este estudio propuso una metodología de valoración de aptitud territorial para acoger la actividad apícola orgánica desde un punto de vista vegetacional, empleando en primer lugar, un procedimiento de evaluación multicriterio que pondera las unidades vegetacionales del catastro de uso de suelo y vegetación del área de estudio a partir de la valorización de tres variables de principal importancia para la selección de forraje por parte de las poblaciones de abeja (preferencia

de especie, dominancia de la especie y grado de cobertura vegetal de la unidad). Una vez obtenidos estos resultados, las unidades fueron caracterizadas de acuerdo a variables topográficas y fenológicas, con el sentido de complementar la valoración de su idoneidad para acoger la actividad apícola.

Los resultados muestran que estas unidades se agrupan en torno a cinco clases con similar o idéntica ponderación. Debido a la consistencia de las tres variables consideradas al interior de cada unidad vegetacional, su ponderación diferenciada de acuerdo a escenarios hipotéticos de aptitud no logra variar el orden de clasificación de las veinte unidades vegetacionales analizadas. Por otro lado, las clases de mayor aptitud son las más predominantes, distribuyéndose a lo largo de laderas de umbría que ofrecen condiciones más favorables para el desarrollo de la vegetación.

Posteriormente, con el sentido de caracterizar y precisar la aptitud vegetacional de estas unidades de acuerdo a su fenología, fueron calculados sus valores promedio de vigor temporal de su vegetación a partir de imágenes compuestas de NDVI. Si bien estos productos arrojan diferencias entre las clases, la carencia de significancia estadística de éstas impide considerarlos como un criterio de refinamiento de la aptitud previamente obtenida. Nightingale *et al.* (2008) obtuvieron una relación consistente entre el NDVI y los estadísticos de media y mediana del flujo de néctar de las colmenas. Asimismo, Sari *et al.* (2020), emplearon el NDVI como indicador de la densidad vegetacional arrojada por el NDVI con los intervalos de fechas de producción de las colmenas. Aunque estos estudios avalan la utilidad que pueden brindar los índices espectrales de vegetación en la caracterización y valorización de variables de vegetación de interés apícola, cabe destacar que en ambos casos éstos fueron vinculados empíricamente a variables de interés medidas a una escala equivalente a su tamaño de píxel. Consecuentemente, la baja capacidad de discriminación de los compuestos usados en el presente estudio podría atribuirse al efecto de haberlos sometido a una agregación espacial (al igual que con las variables topográficas) mediante el promedio de sus datos *raster* al interior de las unidades vegetacionales; que definen la unidad mínima cartográfica de este estudio. De esta manera, futuros estudios deberían explorar el rendimiento de estos compuestos compatibilizando la escala de las variables de vegetación de interés (*e.g.*, unidades vegetacionales) con el tamaño de

píxel del índice en cuestión, mediante mediciones de campo y técnicas de mejoramiento de resolución de las capas temáticas vectoriales (*downscaling*).

A este respecto, la metodología aquí propuesta debería enriquecerse mediante la adición de otras variables de índole vegetal que requerirían mediciones de campo, como lo son la disponibilidad de néctar por planta (productividad) (Maris *et al.*, 2008; Adgaba *et al.*, 2017), o bien la formulación de índices de atractivo apícola (Amiri y Shariff, 2012). Asimismo, deberían incorporarse variables referidas a otros subsistemas del territorio, como aquellas hidrológicas, climáticas y en especial humanas (Maris *et al.*, 2008; Estoque y Murayama, 2010; Amiri y Shariff, 2012). Cabe señalar que la incorporación de más variables si bien otorgaría mayor integralidad al procedimiento de decisión multicriterio, también incrementaría su complejidad, haciendo más necesaria la incorporación de juicios de expertos, con la consabida incertidumbre y subjetividad que ello implica (Zocalli *et al.*, 2017). Por último, para que los escenarios de aptitud generados puedan ser considerados plausibles de ejecutar, es recomendable implementar su validación sobre áreas piloto que ofrezcan flexibilidad para medir la productividad de sus colmenas (Maris *et al.*, 2008; Estoque y Murayama, 2010).

Este estudio busca aportar una metodología eficiente de decisión de territorios aptos desde el punto de vista vegetacional, para acoger la actividad apícola orgánica, aproximando la gestión y planificación del sistema productivo apícola nacional de escala local al uso de geotecnologías que están siendo exitosamente aplicadas en el escenario global, e incrementado con ello, su valía y competitividad internacional.

REFERENCIAS

Adgaba, N., Alghamdi, A., Sammoud, R., Shenkute, A., Tadesse, Y., Ansari, M. J., Sharma, D., Hepburn, C. (2017). Determining spatio-temporal distribution of bee forage species of Al-Baha region based on ground inventory supported with GIS applications and Remote Sensed Satellite Image analysis. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24(5), 1038-1044.

Amiri, F., Shariff, A. (2012). Application of geographic information systems in land-use suitability evaluation for beekeeping: A case study of Vahregan watershed (Iran). *African Journal of Agricultural Research*, 7(1), 88-97.

Amaya, M. (2009). Memoria y aprendizaje en la escogencia floral de las abejas. *Acta Biológica Colombiana*, 14(2), 125-136.

Andrada, A. (2003). Flora utilizada por *Apis mellifera* en el sur del Caldenal. *Revista Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 5(2), 329-336.

Andrada, A., Valle, A., Paoloni, P., Gallez, L. (2004). Pollen and nectar sources used by Honeybee pollinating sunflower (*Helianthus annuus*) in the Colorado River Valley, Argentina. *Boletín Sociedad Argentina de Botánica.*, 39(1-2), 75-82.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). (2013). Catastro de uso de suelo y vegetación [Metadato, base de datos vectoriales]. Ministerio de Agricultura. Disponible en: https://ide.minagri.gob.cl/geonetwork/srv/api/recor ds/%7BF8AE2DCFC-FB88-4760-82B7-B0F8D221EB4F%7D_100121_es/formatters/xsl-view?root=div&output=pdf

Estoque, R. C., Murayama, Y. (2010). Suitability Analysis for Beekeeping Sites in La Union, Philippines, Using GIS and Multi-Criteria Evaluation Techniques. *Research Journal of Applied Sciences*, 5(3), 242-253.

Eastman, J. (2012, junio). IDRISI Selva Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes (Nº 17). Clark University.

Fagúndez, G. (2011). Estudio de los recursos nectaríferos y poliníferos utilizados por *Apis mellifera* L. en diferentes ecosistemas del departamento Diamante (Entre Ríos, Argentina). (Tesis doctoral) Universidad Nacional del Sur.

Fuentes, F. (2016). Manual de Apicultura Orgánica CET Biobío (1.a ed.). Centro de Educación y Tecnología Biobío.

Fundación para la Innovación Agraria (FIA). (2009, abril). Resultados y Lecciones en Sistema de Información Geográfico para Mejoramiento de la Gestión Apícola (Nº 1). Ministerio de Agricultura.

IDE (Infraestructura de Datos Geoespaciales). (2018). Buenas prácticas y casos de éxito en gestión geoespacial (1.a ed.) [Libro electrónico]. Ministerio de Bienes Nacionales. Disponible en:

http://www.ide.cl/images/Publicaciones/Documentos/LIBRO_BUENAS_PRACTICAS_2018.pdf

Insuasty, E., Martínez, J., Jurado, H. (2015). Evaluación del proceso productivo apícola, basado en la caracterización etológica de *Apis mellifera*. *Veterinaria y Zootecnia*, 9(1), 1-15.

Jones, G. Vaughan, R. (2010) *Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications* (1.a ed). Oxford University Press.

Lagos, F. (2017). Tipologías y categorización de apicultores orgánicos chilenos en función de factores protectores de su condición orgánica (Tesis magistral). Universidad de Chile, Santiago.

Luebert, F., Pliscoff, P. (2019). *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile* (3.a ed.). Editorial Universitaria.

Maris, N., Mansor, S., Shafri, H.Z. (2008). Apicultural Site Zonation Using GIS and Multi-Criteria Decision Analysis. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 31, 147-162.

Mariani, V. (2020, enero). *Manual de buenas prácticas apícolas con manejo orgánico* (N° 1). Ministerio de Agroindustria.

May, T., Rodríguez, S. (2012). Plantas de interés apícola en el paisaje: observaciones de campo y la percepción de apicultores en Rep. Dominicana. *Revista Geográfica de América Central*, 1(48), 133-162.

Montenegro, G., Schuck, M., Mujica, A. M., Tellier, S. (1989). Flora utilizada por *Apis mellifera* como fuente de polen en Paine, Región Metropolitana. *Ciencia e Innovación Agraria*, 16(12), 4753.

Montenegro, G. (2004, octubre). Gestión asociativa para mejorar la calidad y diferenciación de los productos apícolas. (N° 1). Fundación para la Innovación Agraria.

Nightingale, J. M., Esaias, W. E., Wolfe, R. E., Nickeson, J. E., Ma, P. L. A. (2008). Assessing Honeybee Equilibrium Range and Forage Supply using Satellite-Derived Phenology. *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1-4.

Rallo, J. (1987, noviembre). La apicultura orientada a la polinización frutal (N° 11). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Rodríguez, S., Velásquez, M. (2011). Lugares de actividad de las abejas (Hymenoptera: Apoidea) presentes en bosque seco tropical del estado Guárico, Venezuela. *Zootecnia Tropical*, 29(4), 421-433.

SAG (Servicio Agrícola Ganadero). (2020, mayo). *Boletín apícola* (N°5). Ministerio de Agricultura.

Sari, F., Kandemir, İ., Ceylan, D. (2020). Integration of NDVI Imagery and Crop Coverage Registration System for Apiary Schedule. *Journal of Apicultural Science*, 64(1), 105-121.

Solorzáno, N., Licata, A. (2012). Flora apícola de los sectores Monte Carlo y Palo Alzado, Municipio Sucre, estado Portuguesa. *Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología*, 30, 81-90.

Severson, D., Parry, J. (1981) A Chronology of Pollen Collection by Honeybees, *Journal of Apicultural Research*, 20(2), 97-103,

Serrano, S., Jiménez-Hornero, F. J., Gutiérrez de Ravé, E., Jodral, M. L. (2008). GIS design application for “Sierra Morena Honey” designation of origin. *Computers and Electronics in Agriculture*, 64(2), 307-317.

Valdés, P. (2014, junio). *Apicultura de precisión* (N° 2). Ministerio de Agricultura; ODEPA; FIA.

Vandame, R., Gänz, P., Garibay, S., Reyes, T. (2012, marzo). *Manual de apicultura orgánica* (N° 1). The Research Institute of Organic Agriculture (FiBL).

Zoccali, P., Malacrino, A., Campolo, O., Laudani, F., Algeri, G. M., Giunti, G., Strano, C. P., Benelli, G., Palmeri, V. (2017). A novel GIS-based approach to assess beekeeping suitability of Mediterranean lands. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24(5), 1045-1050.