

CAMBIOS RECIENTES EN LA ESTRUCTURA PAISAJÍSTICA DEL HUMEDAL DE BATUCO, CHILE CENTRAL

RECENT CHANGES IN THE LANDSCAPE STRUCTURE OF BATUCO WETLAND, CENTRAL CHILE

Sr. Marco A. Peña¹ y Sra. Francisca Velásquez¹

RESUMEN

A pesar de la copiosa normativa creada en los últimos años para proteger el Humedal de Batuco, localizado en la comuna de Lampa; al Noroeste de la Región Metropolitana de Chile, este ecosistema no ha dejado de sufrir una importante degradación, expresada en la modificación de su paisaje. En este estudio evaluamos el cambio temporal experimentado en las últimas décadas por la estructura paisajística de dicho humedal como consecuencia de tal degradación. Para esto, calculamos un conjunto de métricas de paisaje sobre sus principales usos/coberturas de suelo; interpretadas y mapeadas desde una fotografía aérea adquirida en 2005 y una imagen satelital adquirida en 2021, lo que nos permitió medir la magnitud de sus variaciones temporales. La duplicación del área urbana dentro del período de interés se manifestó mediante su avance continuo y regular sobre principalmente, dos coberturas vegetales naturales del humedal: praderas húmedas salobres y matorral de espino abierto. Ambas revisten gran importancia ecológica para el ecosistema en cuestión, viéndose reducidas a parches con menor área de núcleo; evidencia clara de un proceso de fragmentación que confirma la degradación que ha propiciado la ocupación antrópica reciente de suelos del humedal. Mediante este trabajo se espera proveer a la comunidad científica y a los organismos gubernamentales competentes, datos cuantitativos que contribuyan a diagnosticar la degradación del humedal en cuestión, de modo que puedan orientar de manera más eficiente acciones de monitoreo y manejo para su conservación y restauración.

Palabras clave: humedal, ecología del paisaje, métricas de paisaje, cambio temporal, teledetección.

ABSTRACT

In spite of the copious regulations created in the last years to protect the Batuco wetland, located in Lampa county; at the northeast of the Metropolitan Region, Chile, this ecosystem has not stopped suffering a significant degradation, expressed by the modification of its landscape. In this study we evaluated the temporal change experienced in the last decades by the landscape structure of that wetland as a result of such degradation. To do this, we calculated a set of landscape metrics over their main land use/land covers; interpreted and mapped from an aerial photograph acquired in 2005 and a satellite image acquired in 2021, in order to allow us to measure the magnitude of its temporary variations. The doubling of the urban area within the period of interest was manifested by their continuous and regular sprawl over mainly two natural vegetation land covers of the wetland: wet brackish meadows and open thorn scrublands. Both have great ecological significance for the ecosystem under consideration, being reduced to patches with smaller core area; clear evidence of a fragmentation process confirming the degradation propitiated by the recent anthropic occupation of the wetland's soils. Through this research it is expect to provide to the scientific community and the competent government agencies, quantitative data contributing to diagnose the degradation of the wetland in question, so that they can more efficiently guide monitoring and management actions for their conservation and restoration.

Keywords: wetland, landscape ecology, landscape metrics, temporal change, remote sensing.

¹ Departamento de Geografía, Universidad Alberto Hurtado. Almirante Barroso 10, Santiago, Chile

Fecha de recepción: 20 de Octubre de 2022.

Fecha de aprobación: 07 de Noviembre de 2022.

INTRODUCCIÓN

Un humedal es un ecotono o zona transicional entre ecosistemas terrestres y acuáticos, en que la presencia permanente o prolongada de agua, determina sus biotas y paisaje (Wang *et al.*, 2008; López *et al.*, 2013). La Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (Ramsar, 1971), define como humedal a aquellas extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean estas de régimen natural o artificial permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de aguas marinas someras.

Los humedales son uno de los ecosistemas más productivos del planeta, cuya interacción de componentes físicos, biológicos y químicos, les permiten desempeñar servicios ecosistémicos vitales, dentro de los que destacan: suministro y retención de agua, secuestro de carbono, estabilización de la línea de costa (en el caso de marismas), mitigación y control de erosión e inundación, recarga de aguas subterráneas, regulación del clima local y purificación de aguas por retención y remoción de nutrientes, sedimentos y contaminantes (Engle, 2011; Assefa *et al.*, 2021). Desde una perspectiva de ecología del paisaje, un humedal es un ecosistema conformado de parches; unidades espaciales homogéneas a una escala dada, que a su vez se agregan en clases, cuyo ensamble configura un mosaico (McGarigal, 2014). El patrón espacial de estos niveles organizacionales de elementos define la estructura paisajística del ecosistema en cuestión, de la cual dependen sus procesos e interacciones ecológicas (Wang *et al.*, 2008; Gökyer, 2013). Tal estructura puede ser caracterizada mediante métricas de paisaje; indicadores cuantitativos de los parches, clases o mosaicos en términos de su composición (abundancia y variedad) y configuración (forma, tamaño y arreglo espacial) (Gökyer, 2013; McGarigal, 2014).

Debido a su frágil homeostasis ecológica, los humedales son ecosistemas vulnerables a perturbaciones antrópicas; debidas primordialmente a la ocupación de sus suelos y aguas para fines de uso agrícola y urbano (Xu *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2012). Lo anterior, se expresa espacialmente en la fragmentación de su estructura paisajística, y funcionalmente en la degradación y pérdida de sus servicios ecosistémicos (Fahrig, 2003; Engle, 2011).

El Humedal de Batuco, asociado a los afluentes que drenan la sección baja del valle del Río Mapocho; Región Metropolitana de Santiago, Chile, es un ecosistema singular dentro de la zona climática en que se inserta; caracterizada por la sequedad y calidez estival, actuando como reservorio de agua y proveyendo múltiples servicios ecosistémicos; en los últimos años realizados a la luz de la pervasiva sequía que afecta a las Regiones centrales del país (Garreaud *et al.*, 2020; Fuentealba *et al.*, 2021). Junto con albergar una alta biodiversidad de avifauna acuática residente y migratoria, varias de estas amenazadas, este ecosistema además presenta especies endémicas de flora esclerófila, todo lo cual le confiere un alto valor ecológico (The Nature Conservancy, 2019).

Sin embargo, y a pesar de la copiosa normativa creada en las últimas décadas para protegerlo, el humedal experimenta una fuerte degradación, marcada por la pérdida de hábitats y biodiversidad como consecuencia principalmente, de la ocupación de sus suelos mediante loteos y urbanización inmobiliaria, la eutrofización de sus aguas mediante prácticas de agricultura intensiva y el vertido de desechos domiciliarios e industriales, el drenaje de su laguna y napas subterráneas asociadas, así como la captación y desvío de aguas de sus esteros mediante diques y canales de regadío, el deterioro de sus coberturas de suelo a través de la deposición ilegal de basuras y escombros y la extracción de áridos, y la merma de fauna autóctona debida a la introducción de especies asilvestradas, además de la caza y pesca furtiva (CONAMA, 2005; Oterra, 2010; The Nature Conservancy, 2019).

Si bien se han realizado numerosos estudios en el humedal, orientados a medir el estado de diversos de sus componentes ecológicos, describir su flora y fauna y desarrollar planes para su conservación (e.g., Del Campo, 2000; Oterra, 2010; Barrera, 2011; Fox, 2011), aun no se cuenta con una cuantificación explícita acerca de la magnitud de cambio temporal reciente de dicho ecosistema resultante de las perturbaciones enunciadas. El presente estudio busca evaluar el cambio temporal experimentado en las últimas décadas por la estructura paisajística del Humedal de Batuco, bajo el supuesto de que su degradación reciente se expresaría en la pérdida y fragmentación de las clases de parches que componen su ecosistema. Para esto fueron aplicadas varias métricas de paisaje sobre sus principales usos/coberturas de suelo; interpretadas y mapeadas desde una

fotografía aérea adquirida en 2005 y una imagen satelital adquirida en 2021, a fin de medir la magnitud de sus variaciones temporales. Mediante este trabajo se espera proveer a la comunidad científica y a los organismos gubernamentales competentes, de datos cuantitativos que contribuyan a diagnosticar la degradación del humedal en cuestión, de modo que puedan orientar de manera más eficiente acciones de monitoreo y manejo para su conservación y restauración.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El Humedal de Batuco (33° 15' 23" S – 70° 49' 11" O); conformado por la laguna homónima y sus llanuras higromórficas circundantes, es el de mayor extensión y relevancia ecológica dentro del sistema de humedales ubicados en la comuna de Lampa; al Noroeste de la Región Metropolitana de Chile. Este se distribuye en las planicies de la microcuenca de Batuco (480 m.s.n.m.); a su vez inserta en la mesocuenca del Río Mapocho, perteneciente a la macrocuenca del Río Maipo, quedando rodeado al Norte por el Cerro Polpaico, al Este por el Cerro El Manzano y al Oeste por el Cerro Chape. El humedal está sujeto a un bioclima Mediterráneo de carácter pluviestacional-continental, caracterizado por una temperatura máxima y mínima promedio de 28 y 12 °C, respectivamente, en los meses de verano y una temperatura máxima y mínima promedio de 14 y 3 °C, respectivamente, en los meses de invierno (Rivas-Martínez, 1996; Luebert y Pliscoff, 2019). Durante las últimas dos décadas, este recibe en promedio 63 mm de lluvia en los meses de invierno, mientras que en los meses de verano se registra un promedio de 2 mm (Weather Spark, 2022).

La Laguna de Batuco, de carácter hipertrófica, alcanza una extensión aproximada de 2,9 km² y una profundidad máxima de 50-70 cm en los meses de invierno, mientras que en verano tiende a evaporarse y secarse casi por completo. En el pasado, esta recibía aportes hídricos de las laderas orientales colindantes y de los Esteros Lampa y Colina, pero en la actualidad, estos se remiten más bien a la planta de tratamiento de aguas servidas La Cadellada y en menor grado a aguas lluvia (Del campo, 2000; The Nature Conservancy, 2019).

La vegetación nativa del área de estudio corresponde originalmente a formaciones de

bosque esclerófilo, sin embargo, al haber sido fuertemente degradada en las últimas décadas, esta hoy más bien toma la forma de un bosque espinoso abierto, dominado por arbustos altos y árboles de espino (*Acacia caven* (Molina) Molina) y algarrobo (*Prosopis chilensis* (Molina) Stuntz), sumado a variadas plantas halófitas (Gajardo, 1994). En cuanto a la fauna, también altamente degradada como consecuencia de la alteración y pérdida de su hábitat, se compone de varias especies ícticas y bentónicas, así como de 159 especies de vertebrados terrestres; 4 anfibios, 9 reptiles, 122 aves y 24 mamíferos, varias de estas endémicas y en alguna categoría de amenaza (Barrera, 2011).

El Humedal de Batuco es "Área de Preservación Ecológica" según el Plan Regulador Metropolitano de Santiago y "Sitio Prioritario para la Conservación de la Biodiversidad" (Resolución Exenta N° 585/2005) según la "Estrategia Regional de Biodiversidad" del Ministerio del Medio Ambiente, Además, es "Zona Prohibida de Caza" (Decreto Exento N° 23/1995) de acuerdo al SAG (Servicio Agrícola Ganadero), "Zona de Preservación Ecológica" (Resolución N° 39/1997) de acuerdo al Gobierno Regional, "Cuerpo de Agua Lacustre" (oficio N° 515) de acuerdo a la DGA (Dirección General de Aguas), "Sitio de Interés Turístico Nacional" (Resolución Exenta N° 342/2009) de acuerdo al SERNATUR (Servicio Nacional de Turismo) y "Área Importante para la Conservación de las Aves" según *Birdlife International*. Más recientemente, el humedal ha sido declarado "Santuario de la Naturaleza" (Decreto N° 20/2021) por el Consejo de Monumentos Nacionales (Oterra, 2010; GORE, 2014; The Nature Conservancy, 2019; Biblioteca del Congreso Nacional, 2021).

A pesar de lo anterior y como fuera referido en la introducción de este artículo, el humedal ha sufrido recurrentes y diversas perturbaciones que amenazan su conservación. Solo por nombrar aquellas más recientes y emblemáticas, la Inmobiliaria e Inversiones Quilicura S.A desecó el 80 % de la Laguna de Batuco producto de la extracción sostenida de sus aguas desde 2009 (Orellana, 2019). La inmobiliaria Inversiones Lampa SpA rellenó 400 mil m² del Humedal de Puente Negro Sur; parte del "Sitio Prioritario Humedal de Batuco" (Codexverde, 2021). La empresa sanitaria Aguas Santiago Norte S.A., vendió 2.500 m³ de agua destinada al humedal a la minera Anglo American (Chicureo Hoy, 2021).

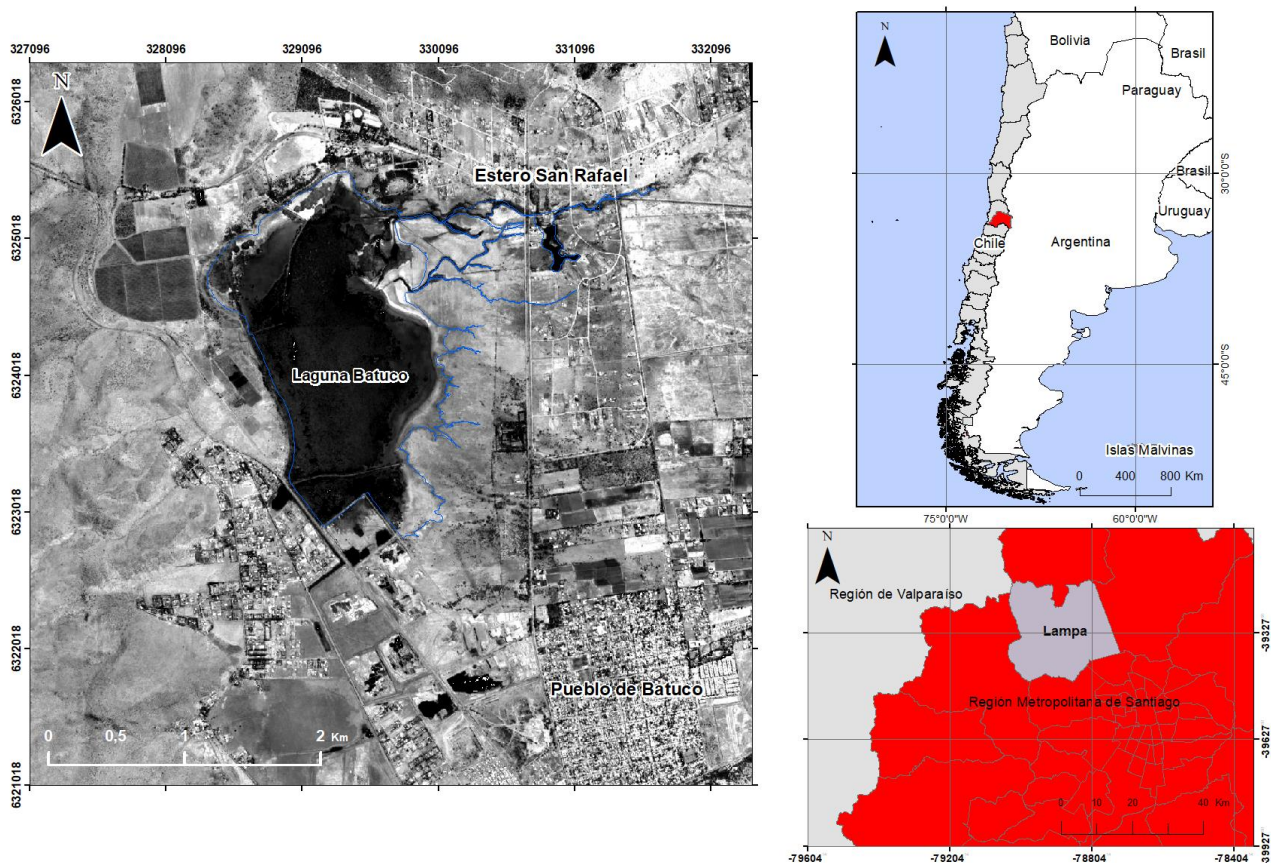


Figura 1. Contexto de ubicación general del Humedal de Batuco; su cuerpo de agua y llanuras asociadas, perteneciente a la comuna de Lampa, Región Metropolitana de Chile.
Fuente: Elaboración propia.

La definición cartográfica del Humedal de Batuco puede ser muy variable dependiendo de los criterios empleados para definir su alcance espacial. En el presente trabajo, acotamos el humedal a un área de sólo ~30 km², similar a la propuesta por el “Plan de Ordenamiento Territorial para la Conservación y Uso Sustentable de la Laguna de Batuco” (Oterra, 2010), en base al área de protección ecológica definida por el “Plan Regulador Metropolitano de Santiago”, que inscribe a la Laguna Batuco y las unidades ecosistémicas que conforman su entorno inmediato: juncales-torales, praderas húmedas salobres y matorral dominado por espino (Figura 1).

MATERIALES

Se emplearon los geodatos provistos por el “Catastro de Suelo y Vegetación”, disponible en línea desde el geportal de la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE, 2019), además de información técnica disponible en línea en el

“Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Forestales Nativos de Chile” (SIMEF, 2019).

Por otro lado, se empleó una fotografía aérea de escala 1:20.000, adquirida en la primavera de 2005 por el SAF (Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile), dispuesta originalmente en los metadatos digitales anexados al “Plan de Ordenamiento Territorial para la Conservación y Uso Sustentable de la Laguna de Batuco” (Oterra, 2010), y una imagen satelital de alta resolución espacial descargada desde Google Earth®, adquirida en la primavera de 2021. Ambos productos fueron proyectados al sistema UTM (Universal Transversal de Mercator) WGS-84 (*World Geodetic System*, 1984), huso 19, con un tamaño de píxel de 3 m, asegurando un corregistro espacial con un error medio cuadrático inferior a medio píxel.

MÉTODOS

Sobre cada una de las imágenes del área de estudio: 2005 (fecha inicial) y 2021 (fecha final), fueron interpretadas visualmente y delimitadas manualmente sus principales coberturas/ usos de suelo, tomando como referencia cartográfica la capa temática vectorial “Uso de tierra” del catastro ya mencionado. Las clases definidas son presentadas y descritas en la Tabla 1.

Las clasificaciones de ambas fechas fueron rasterizadas para ser ingresadas al programa Fragstats® versión 4.2 (Oregon State University,

Corvallis, EE. UU.), a partir del cual fue calculada una serie de métricas de paisaje presentadas en la Tabla 2.

Las métricas de ecología del paisaje pueden ser aplicadas a tres niveles de unidades espaciales: parche, clase y paisaje. En este estudio, fueron aplicadas siete métricas a nivel de clase (de cobertura/uso de suelo); dos de composición: referidas a la variación y abundancia de parches en la clase, y cinco de configuración: caracterizadoras de la forma y el arreglo espacial de los parches en la clase (McGarigal, 2002).

Clase	Sigla	Descripción
Área urbana	AU	Pueblo, zona industrial.
Matorral abierto	MA	Vegetación leñosa originada por la degradación del bosque original o abandono de tierras dedicadas a la agricultura (cobertura 20-30 %).
Matorral con suculentas abierto	MSA	Vegetación esclerófila compuesta por plantas de hojas duras y cactáceas, en su mayoría Huañil (<i>Proustia cuneifolia tipia</i> D. Don Ssp. (Phil.) Luebert 2018) y Quisco (<i>Chiloenses echinopsis</i> (Colla) H. Friedrich & G.D. Rowley 1974) (cobertura 20-30%).
Matorral muy abierto	MMA	Vegetación leñosa originada por la degradación del bosque original o abandono de tierras dedicadas a la agricultura. En su mayoría Espino (<i>Acacia caven</i> . Molina. Hook. & Arn.) y Quillay (<i>Quillaja saponaria</i> Molina) (cobertura < 10 %).
Matorral semidenso	MSD	Vegetación leñosa originada por la degradación del bosque original o abandono de tierras dedicadas a la agricultura, en su mayoría Espino y hierba velluda (<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'Hér. ex Aiton, 1789) (cobertura 40-60 %).
Matorral con suculentas muy abierto	MSMA	Vegetación esclerófila compuesta por plantas de hojas duras y cactáceas, en su mayoría Espino y Quisco (cobertura < 10 %).
Bosque nativo renoval abierto	BNRA	Bosque renoval de tipo esclerófilo del valle central de Chile, distribución discontinua, en su mayoría Litre (<i>Lithraea caustica</i> Molina. Hook. et Arn. 1842) (cobertura 20-30 %).
Bosque nativo renoval muy abierto	BNRMA	Bosque renoval de tipo esclerófilo, distribución discontinua, en su mayoría Litre y Colliguay (<i>Colliguaja odorifera</i> Molina 1782) (cobertura < 10 %).
Bosque nativo renoval denso	BNRD	Bosque renoval de tipo esclerófilo del valle central de Chile, distribución discontinua, en su mayoría Espino y Palo santo (<i>Porlieria chilensis</i> I.M. Johnst. 1938) (65-80 % de cobertura).
Bosque nativo renoval semidenso	BNRSD	Bosque renoval de tipo esclerófilo del valle central de Chile, distribución discontinua, en su mayoría Espino y Huañil (cobertura 40-60 %).
Rotación cultivo pradera	RCP	Sistema de siembra en el cual se rota el uso de la tierra en periodos de cultivo y pradera.
Pradera anuales	PA	Bioma caracterizado por un clima templado y vegetación en su mayoría hierbas.
Laguna Batuco	LB	Zona de tierra plana que se inunda permanentemente, saturando el suelo. Alberga flora y fauna dentro de su ecosistema.

Tabla 1. Descripción de las clases de cobertura/uso de suelo definidas en el Humedal de Batuco.
Fuente: SIMEF (2019).

Métrica		Descripción
Nombre	Categoría	
Área total absoluta	Composición	Suma absoluta de las áreas de todos los parches de una misma clase.
Área total porcentual	Composición	Suma porcentual de las áreas de todos los parches de una misma clase.
Área promedio	Configuración	Área promedio de los parches de una clase.
Radio de giro	Configuración	Distancia promedio del parche de una clase con respecto a su respectivo centroide.
Índice de forma	Configuración	División normalizada entre el perímetro de un parche de una clase y su área, comparada con una forma euclidiana estándar del mismo tamaño que el parche.
Índice de área núcleo	Configuración	Porcentaje del parche de una clase que corresponde a su núcleo.
Índice de proximidad	Configuración	Suma del tamaño de cada parche de una clase, entre aquellos cuyos bordes están dentro el radio focal del parche, dividido por el cuadrado de su distancia desde el parche focal.

Tabla 2. Descripción de las métricas de paisaje empleadas. Fuente: Adaptado de McGarigal (2002).

Los resultados de cada métrica aplicada a las imágenes fueron presentados y analizados en términos de su media (\bar{X}) y desviación estándar (σ), en tanto que la magnitud de cambio de cada métrica dentro del período de interés, fue presentada en la forma de diferencias promedio, tanto absoluta (Δx) como relativa ($\Delta\%$), entre ambas imágenes.

RESULTADOS

La Figura 2 muestra la distribución espacial de las clases de cobertura/uso de suelo definidas en el humedal para cada fecha de interés. Su comparación permite apreciar la marcada expansión del suelo urbano, en especial sobre suelos otrora correspondientes a rotación cultivo-pradera; que a su vez se expandieron a suelos antes cubiertos por matorral abierto. En efecto, las Tablas 3 y 4; y Figuras 3A y 3B, constatan un aumento del área total y del tamaño

promedio de los parches de suelo urbano de 92,96 % dentro del período de interés. En tanto que, a excepción del matorral muy abierto, las clases de matorral y bosque experimentaron un descenso de área variable en dicho período, destacando el matorral abierto (-61,01 y -78,34 %, respectivamente, según Tablas 3 y 4).

De acuerdo a la Tabla 5 y Figura 3C, el radio de giro de los parches de suelo urbano experimentó un aumento promedio de 72,33 % en el período de interés; indicativo de que el incremento en el área total de esta clase resultó del importante incremento en el tamaño de sus parches. La mayoría de las clases restantes disminuyeron su radio giro promedio en el período, en especial la de matorral abierto (-56,23 %), lo que revela que el decremento en el área total de esta resultó de un importante decremento en el tamaño de sus parches

Clase de suelo	Área total					
	2005		2021		2021-2005	
	m ²	%	m ²	%	Δx	$\Delta\%$
AU	5.120.400	15,67	9.880.700	30,23	4.760.300	92,96
MA	4.005.900	12,26	1.561.600	4,77	-2.444.300	-61,01
MSA	423.000	1,29	373.100	1,14	-49.900	-11,79
MMA	449.000	1,37	480.500	1,47	31.500	7,01
MSD	792.500	2,42	507.000	1,55	-285.500	-36,02
MSMA	5.382.900	16,47	5.87.400	15,56	-295.500	-5,48
BNRA	271.400	0,83	271.400	0,83	-	-
BNRMA	732.000	2,24	488.500	1,49	-243.500	-33,26
BNRD	248.900	0,76	220.800	0,75	-28.100	-11,28
BNRSD	120.000	0,36	120.000	0,36	-	-
RCP	6.204.800	18,98	6.012.800	18,40	-192.000	-3,09
PA	4.002.700	12,25	2.749.600	8,41	-1.253.100	-31,30
LB	2.914.600	8,91	2.914.600	8,91	-	-

Tabla 3. Área total de las coberturas/ usos de suelo de interés en 2005 y 2021, y su diferencia temporal.

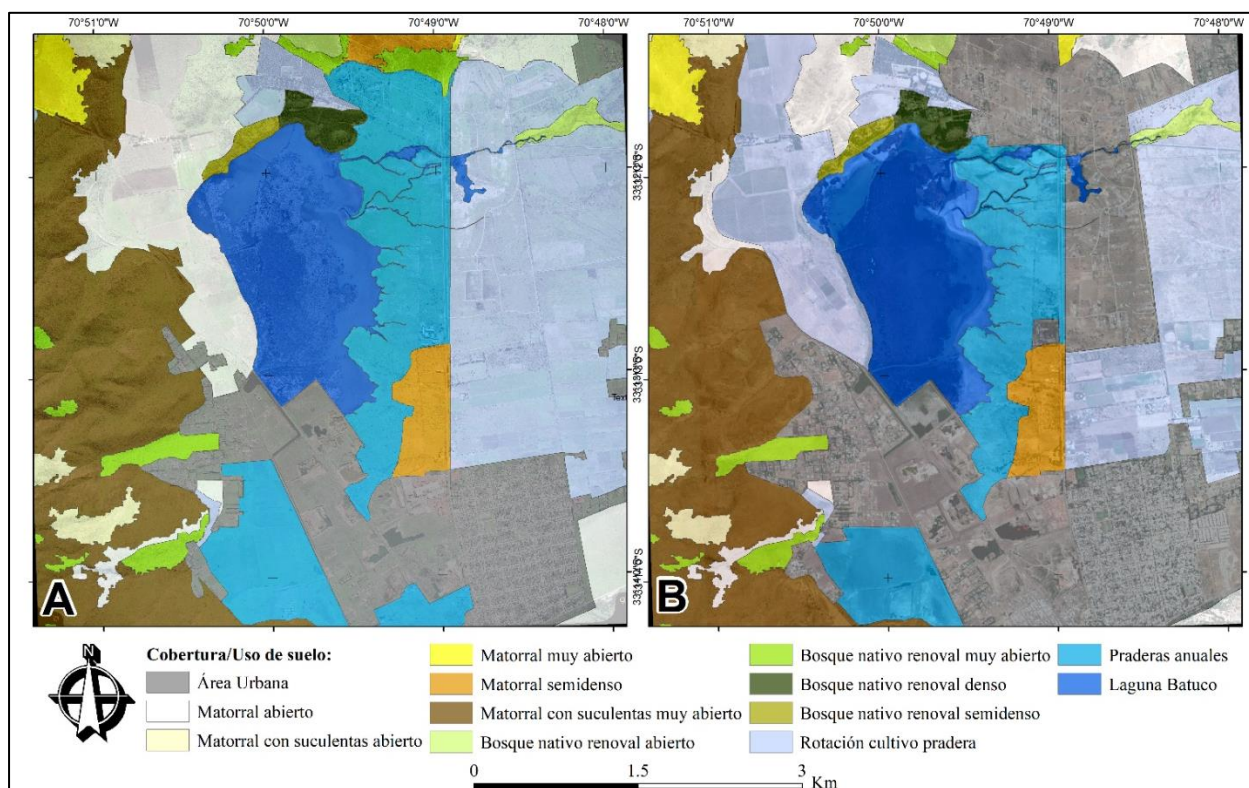


Figura 2. Distribución espacial de las coberturas/ usos de suelo definidas en el Humedal de Batico para las fechas inicial, 2005 (A), y final, 2021 (B).
Fuente: Adaptado de IDE (2019).

Clase de suelo	Área promedio (m ²)					
	2005		2021		2021-2005	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	Δx	$\Delta\%$
AU	640.052	1.492.606	1.235.093	1.967.060	595.041	92,96
MA	801.197	1.043.254	173.516	197.165	-627.681	-78,34
MSA	60.430	72.200	53.306	60.494	-7.124	-11,78
MMA	149.668	173.941	160.167	168.811	10.499	7,01
MSD	264.174	207.298	11.792	76.413	-252.382	-95,53
MSMA	2.691.480	2.691.472	2.543.720	2.543.712	-147.760	-5,48
BNRA	91.048	57.811	90.484	57.508	-564	-0,61
BNRMA	73.207	65.183	54.287	50.872	-18.920	-25,84
BNRD	248.900	-	230.524	-	-18.376	-7,38
BNRSD	120.032	-	120.215	-	183	0,15
RCP	1.240.963	1.826.225	668.090	1.099.090	-572.873	-46,16
PA	800.559	418.649	687.420	461.798	-113.139	-14,13
LB	2.914.600	-	2.914.600	-	-	-

Tabla 4. Área promedio de las coberturas/ usos de suelo de interés en 2005 y 2021, y su diferencia temporal

En cuanto al índice de forma, la Tabla 6 y Figura 3D permiten apreciar que los parches de suelo urbano exhibieron un ligero decremento promedio en la irregularidad de sus bordes durante el período de interés (-8,57 %); indicativo de que el incremento en el área total de esta clase fue aparejado de un incremento en la compacidad de sus parches. En

tanto, las clases restantes aumentaron la irregularidad promedio de sus bordes en el período, en particular las de matorral muy abierto y semidenso (-24,05 %), lo que confirma que el decremento en el área total de esas clase comportó la reducción de la continuidad geométrica de sus parches.

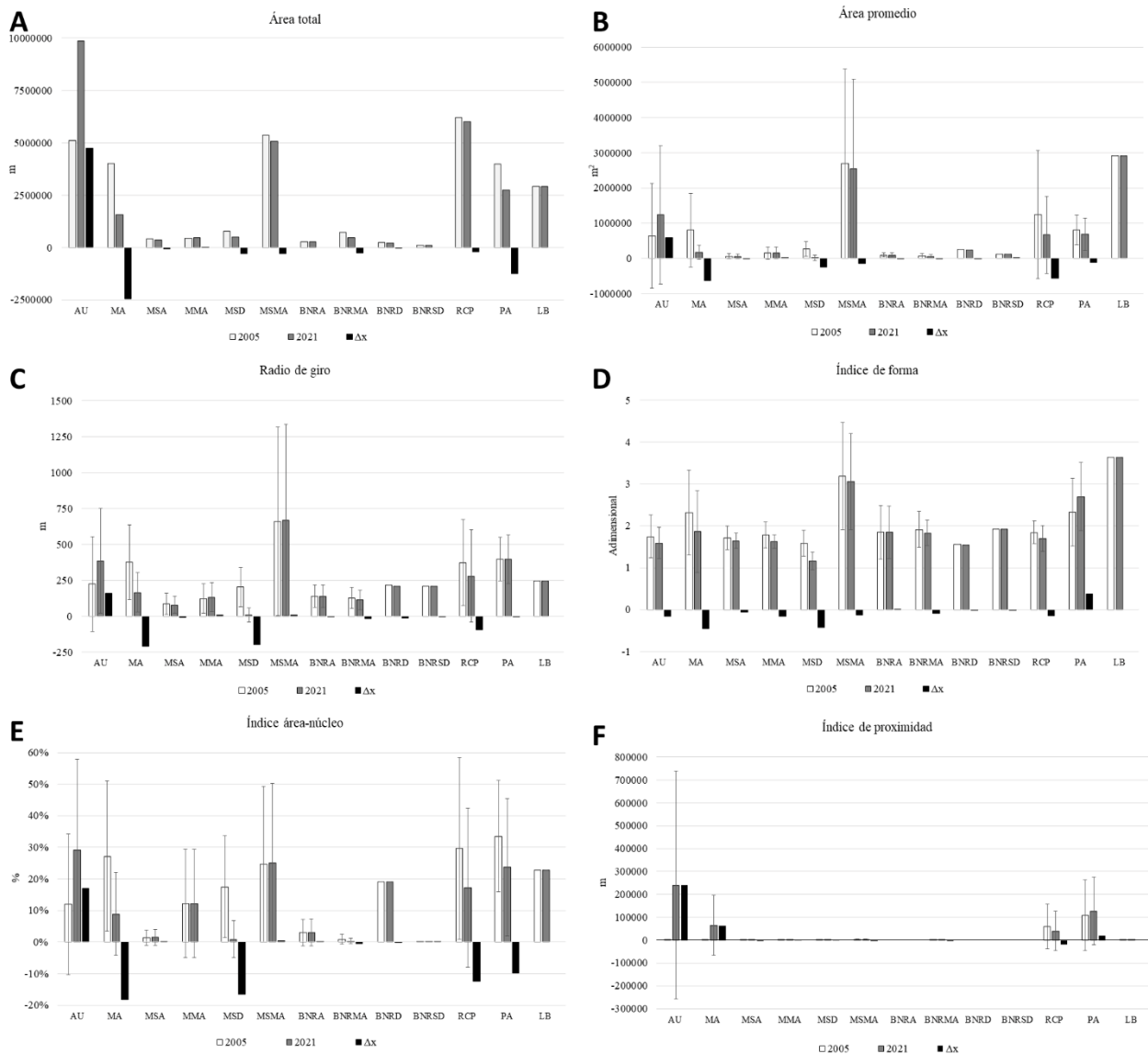


Figura 3. Promedio y desviación estándar de las métricas de paisaje aplicadas sobre los usos/coberturas de suelo del Humedal de Batuco (AU: Área urbana; MA: Matorral abierto; MSA: Matorral con suculentas abierto; MMA: Matorral muy abierto; MSD: Matorral semidenso; MSMA: Matorral con suculentas muy abierto; BNRA: Bosque nativo renoval; BNRMA: Bosque nativo renoval muy abierto; BNRD: Bosque nativo renoval denso; BNRSD: Bosque nativo renoval semidenso; RCP: Rotación cultivo pradera; PA: Pradera anuales; LG: Laguna Batuco) y su diferencia temporal (Δx).

El índice de área-núcleo (Tabla 7, Figura 3E) por su parte, revela que el suelo urbano aumentó fuertemente su área libre de bordes en el período de interés (142,5 %), confirmando la compacidad de su expansión. Las clases de suelo restantes, en su mayoría experimentaron descensos en esta métrica a lo largo del período, en particular aquellas

de matorral semidenso (-94,82 %), matorral abierto (-67,15 %) y bosque nativo renoval muy abierto (-63,07 %), confirmando una reducción de su área total aparejada a una pérdida de compacidad de sus parches, en muchos casos concordante con el aumento en la irregularidad de sus bordes.

Cambios recientes en la estructura paisajística del Humedal de Batuco, Chile Central
Peña y Velásquez

Clase de suelo	Radio de giro (m)					
	2005		2021		2021-2005	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	Δx	$\Delta\%$
AU	223,37	329,24	384,93	366,67	161,56	72,33
MA	375,43	259,54	164,34	137,50	-211,10	-56,23
MSA	87,23	73,64	78,91	59,88	-8,33	-9,54
MMA	123,05	100,80	131,96	101,38	8,91	7,24
MSD	203,69	136,76	8,14	49,43	-195,55	-96
MSMA	658,87	656,50	668,46	666,09	9,58	1,45
BNRA	140,06	77,32	139,83	77,65	-0,23	-0,16
BNRMA	127,97	74,71	113,27	68,27	-14,71	-11,50
BNRD	218,94	-	208,46	-	-10,49	-4,79
BNRSD	208,31	-	208,22	-	-0,09	-0,05
RCP	371,70	299,22	279,08	322,08	-92,62	-24,92
PA	397,63	150,85	395,83	171,10	-1,80	-0,45
LB	247,25	-	247,25	-	-	-

Tabla 5. Radio de giro de las coberturas/ usos de suelo de interés en 2005 y 2021, y su diferencia temporal.

Clase de suelo	Índice de forma (m)					
	2005		2021		2021-2005	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	Δx	$\Delta\%$
AU	1,74	0,50	1,59	0,37	0,16	-8,57
MA	2,31	1,00	1,86	0,98	0,46	-18,10
MSA	1,71	0,28	1,64	0,18	0,07	-6,43
MMA	1,77	0,31	1,63	0,16	0,15	-24,05
MSD	1,58	0,31	1,17	0,21	0,42	-24,05
MSMA	3,18	1,28	3,05	1,15	0,14	-2,82
BNRA	1,84	0,63	1,85	0,63	0,00	-2,7
BNRMA	1,91	0,43	1,83	0,30	0,09	-5,75
BNRD	1,56	-	1,54	-	0,02	-3,84
BNRSD	1,91	-	1,92	-	-	-1,04
RCP	1,84	0,27	1,70	0,31	0,15	-7,6
PA	2,32	0,80	2,70	0,82	-0,38	16,37
LB	3,64	-	3,64	-	-	-

Tabla 6. Índice de forma de las coberturas/ usos de suelo de interés en 2005 y 2021, y su diferencia temporal.

Clase de suelo	Índice área-núcleo (%)					
	2005		2021		2021-2005	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	Δx	$\Delta\%$
AU	12	22,28	29,11	28,85	17,11	142,55
MA	27,16	23,76	8,92	13,18	-18,24	-67,15
MSA	1,39	2,38	1,53	2,50	0,14	10,40
MMA	12,14	17,18	12,14	17,18	-	-
MSD	17,42	16,13	0,9	5,84	-16,52	-94,82
MSMA	24,68	24,68	25,11	25,11	0,43	1,73
BNRA	2,98	4,21	3,05	4,32	0,07	2,45
BNRMA	0,9	1,63	0,33	0,83	-0,57	-63,07
BNRD	19,12	-	19,10	-	-0,03	-0,14
BNRSD	0	-	0,01	-	0,00	13,23
RCP	29,63	28,72	17,20	25,1	-12,43	-41,93
PA	33,53	17,64	23,71	21,7	-9,82	-29,27
LB	22,77	-	22,77	-	-	-

Tabla 7. Índice área-núcleo de las coberturas/ usos de suelo de interés en 2005 y 2021, y su diferencia temporal.

Clase de suelo	Índice de proximidad (m)					
	2005		2021		2021-2005	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	Δx	$\Delta\%$
AU	195,08	316,56	240.590,29	497.170,67	240.395	123.226
MA	6,93	10,81	64.238,03	131.981	64.231	926.307
MSA	9,73	9,49	9,58	9,59	-0,16	-1,61
MMA	332,68	470,45	521,7	737,77	189,02	56,81
MSD	116,66	164,2	239,83	868,41	123,17	105,57
MSMA	3.219,41	3.219,4	3.042,67	3.042,66	-176,74	-5,48
BNRA	-	-	-	-	-	-

BNRMA	1,49	1,05	0,96	0,63	-0,53	-35,23
BNRD	-	-	-	-	-	-
BNRSD	-	-	-	-	-	-
RCP	59.785,39	97.977,95	39.432,98	86.803,49	-20.352	-34,04
PA	108.830,55	154.140,04	127.334,01	147.068,21	-18.503	17
LB	423,93	-	423,93	-	-	-

Tabla 8. Índice de proximidad de las coberturas/ usos de suelo de interés en 2005 y 2021, y su diferencia temporal.

Por último, debido a la aparición en 2021 de nuevos y relativamente grandes parches de suelo urbano y de matorral abierto; otrora reducidas a muy pocos parches continuos, ambas clases sufrieron un aumento singularmente ostensible del índice de proximidad en el período de interés (123.226 y 926.307 %, respectivamente, según Tabla 8, Figura 3E). No obstante, en el resto de las clases de suelo, esta métrica alcanzó valores más conservadores, dependiendo de la naturaleza espacial de su fragmentación en el período de interés. Así, por ejemplo, el índice de proximidad de las clases de matorral muy abierto y matorral semidenso aumentó en 56,81 y 105,57 %, respectivamente, dentro del período, producto de su agregación en parches más cercanos entre sí, en tanto que en las clases de bosque nativo renoval muy abierto semidenso y rotación cultivo pradera, dicho índice descendió en -35,23 y -34,04 %, respectivamente, dentro del período, producto de su desagregación en parches más alejados entre sí.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A través de la aplicación de un conjunto de métricas de composición y configuración del paisaje, este trabajo buscó mensurar la magnitud de cambio experimentada entre 2005 y 2021 por las coberturas/ usos de suelo que conforman al Humedal de Batuco; sujeto a una continua presión antrópica consignada como causante de la degradación de su ecosistema. Los resultados evidenciaron la virtual duplicación del área urbana en el período de interés, avanzando de forma continua y regular en la forma de loteos de suelos correspondientes, en gran medida, a praderas húmedas salobres situadas al Sur de la laguna, y cultivos agrícolas de hortalizas situados al Este de la misma. Este proceso ha comportado la división sistemática de terrenos de entre 500 y 1.000 m², que buscan ser destinados a proyectos residenciales de mediana densidad (Seguel, 2016; Plataforma Urbana, 2022). La urbanización de cultivos de hortalizas en el período de interés, sin embargo, fue contrarrestada por el avance de

cultivos de frutales en suelos fundamentalmente cubiertos por matorral abierto, colindantes con la orilla Oeste de la laguna. De esta manera, dos coberturas vegetales naturales aledañas a la Laguna de Batuco: praderas y matorral abierto, se han visto mayormente afectadas por procesos recientes de ocupación antrópica de suelos, amenazando con acentuar la degradación del ecosistema del área de estudio.

La primera cobertura, corresponde a un ecotono entre la laguna y las formaciones de vegetación esclerófila que la circundan, compuesto por una cobertura herbácea halófila, donde dominan la grama salada (*Distichlis spicata* (L.) Greene) y la hierba del salitre (*Frankenia salina* (Molina) I.M. Johnst.), en tanto que otras especies endémicas como amaranto (*Amaranthus looseri* Suess) y cenizo (*Atriplex philippi* R.E. Fr.), son menos frecuentes de observar. En estas praderas anida el piquén (*Chloephaga melanoptera* o *Oressochen melanopterus* Eyton, 1838), ave anseriforme que por su abundancia confiere al Humedal de Batuco la categoría de “importancia internacional”, según Ramsar (2007), destacándose la pérdida de su hábitat a causa de fragmentación originada por la ocupación de suelo antrópica, y la consecuente invasión de especies exóticas más tolerantes, como sus principales amenazas (Barrera, 2011; The Nature Conservancy, 2019). En efecto, las métricas aquí empleadas revelaron que esta cobertura, junto con experimentar una importante constricción en su área total, disminuyó su área de núcleo, incrementando la irregularidad en el contorno de sus parches.

En cuanto a la cobertura de matorral abierto, se trata de remanentes de lo que antaño fueran formaciones de bosques de espinillo o de tipo esclerófilo, actualmente reducidas a especies de espinillo raras, resultando muy inusual observarla con cierta continuidad espacial en terrenos llanos de la zona central de Chile, a causa de la marcada ocupación antrópica de suelos. Más aún, en las inmediaciones del humedal esta cobertura puede incluir Palo Santo o Guayacán y Algarrobo

(*Prosopis chilensis* (Molina) Stuntz emend. Burkart), ambas especies clasificadas como vulnerables por el Ministerio de Medio Ambiente, cuyo valor ecológico estriba, entre otros aspectos, en los numerosos atributos que poseen como reguladores climáticos en ambientes xerófitos (Donoso 1981, Valdivia y Romero, 2013; CONAF, 2015). No obstante, los resultados aquí obtenidos, dejan de manifiesto el importante deterioro paisajístico que ha experimentado en las últimas décadas esta cobertura, desmembrándose y contrayéndose a parches de menor tamaño y de contornos más regulares, lo que ha tenido por efecto incrementar su área de núcleo.

Uno de los componentes ecológicos más críticos del Humedal de Batuco es su laguna, incluyendo sus subdivisiones artificiales, como el Tranque San Rafael, construido por la planta de tratamiento La Cadellada. Al interior de esta proliferan juncales y totorales (~1,57 km²), conformando un ecosistema de alta fragilidad para el humedal, del cual numerosas especies de avifauna endémicas dependen para anidar y pernoctar (patos, garzas y aves gruiformes o terrestres, como el Pidencito; *Laterallus jamaicensis* (Gmelin, 1789)), varias de ellas amenazadas, además de constituir un hábitat insustituible para la rana chilena (*Calyptocephalella gayi* Duméril & Bibron, 1841), también en categoría de amenaza (The Nature Conservancy, 2019). Sin embargo, debido a las fluctuaciones temporales del área del espejo de agua en respuesta a la variabilidad climática natural y antropogénica, este estudio optó por excluirla del análisis de métricas de paisaje, asumiendo una ribera constante en el tiempo. Futuros estudios podrían focalizarse en rastrear y esclarecer la naturaleza de tales fluctuaciones de la laguna, para con ello indagar sus efectos a largo plazo en la ecología dependiente.

En atención al escenario actual de amenaza que enfrentan los biomas propios de la zona central del país, marcado por el cambio climático y la subsecuente prolongación de la megasequía (Garreaud *et al.*, 2020; Fuentealba *et al.*, 2021), aminorar la degradación del Humedal de Batuco inducida por la ocupación antrópica de sus suelos se torna en una tarea de principal orden para conservar y restaurar su ecosistema, inherentemente singular. Esta tarea cobra mayor preponderancia a la luz de la reciente promulgación de la Ley N° 21.202 de Humedales Urbanos (Ministerio del Medio Ambiente, 2020), que busca

proteger aquellos humedales que se encuentren total o parcialmente dentro de un radio urbano, dotando a las entidades gubernamentales de nuevas herramientas que permitan incluirlos como “áreas de protección de valor natural” en los instrumentos de planificación territorial del país. En atención a lo anterior, el presente trabajo busca proveer a la comunidad científica y a los organismos gubernamentales competentes, de datos cuantitativos que contribuyan a diagnosticar la degradación del humedal en cuestión, siendo la ecología del paisaje una aproximación teórica y metodológica que posibilita componer con relativa simpleza y certeza la magnitud de cambio temporal de su ecosistema, contribuyendo a eficientar su monitoreo y manejo.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSEFA, W., ENEYEW, B., WONDIE, A. “The impacts of land-use and land-cover change on wetland ecosystem service values in peri-urban and urban area of Bahir Dar City, Upper Blue Nile Basin, Northwestern Ethiopia”. *Ecological Processes*. 2021, vol 10, núm 39.

BARRERA, S. “Análisis del nivel hídrico y las condiciones del humedal de la Laguna de Batuco”. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Universidad de Chile, Escuela de Geografía, Santiago, 2011. 212 p.

BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL. “Congreso Nacional de Chile”. 2021. [en línea] [fecha de la consulta: 21 de septiembre 2022]. Disponible en web: <https://www.bcn.cl/portal/>

CHICUREO HOY. “SMA formuló cargos contra empresa que vendió agua que debía ser destinada a canal de regadío en Batuco”. 2021. [en línea] [fecha de la consulta: 21 de septiembre 2022]. Disponible en web: <https://www.chicureohoy.cl/actualidad/sma-formulo-cargos-contr-empresa-que-vendio-agua-que-debia-ser-destinada-a-canal-de-regadio-en-batuco/>

CODEXVERDE. “SMA sancionó a proyecto inmobiliario de Lampa con más de \$1.300 millones”. 2021. [en línea] [fecha de la consulta: 21 de septiembre 2022]. Disponible en web: <https://codexverde.cl/sma-sanciono-a-proyecto-inmobiliario-de-lampa-con-mas-de-1-300-millones/>

- CONAF. "Informe Estado de conservación Porlieria chilensis: Evaluación a través de modelos poblacionales matriciales, ecología y patrones de distribución". Santiago: *Fondo de Investigación de Bosque Nativo*, 2015, 38 p.
- CONAMA (COMISIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE). "Plan de acción Humedal Batuco 2005-2010 para la implementación de la Estrategia para la Conservación de la Biodiversidad en la Región Metropolitana de Santiago". Santiago: CONAMA, 2005, 150 p.
- DEL CAMPO, P. "Antecedentes florísticos y vegetacionales del humedal Laguna de Batuco". Santiago: *Universidad Central de Chile*, 2000, 280 p.
- ENGLE, V.D. "Estimating the provision of ecosystem services by Gulf of Mexico coastal wetlands". *Wetlands*. 2011, vol 31, p. 179-193.
- FAHRIG, L. "Effects of habitat fragmentation on biodiversity". *Annual Review of Ecology and Systematics*. 2003, vol 34, p. 487-515.
- FOX, O. "Proyecto de restauración ecológica del humedal Laguna de Batuco, Región Metropolitana de Santiago, Chile". Memoria para optar al grado académico de Magíster en Asentamientos Humanos y Medio Ambiente. Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales, Santiago, 2011, 148 p.
- FUENTEALBA, M., BAHAMÓNDEZ, C., SARRICOLEA, P., MESEGUER-RUIZ, O., LATORRE, C. "The 2010–2020 'megadrought' drives reduction in lake surface area in the Andes of central Chile (32° - 36°S)". *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021, vol 38, 100952.
- GAJARDO, R. "La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica." Santiago: *Editorial Universitaria*, 1994, 165 p.
- GARREAUD, R.D., BOISIER, J.P, RONDANELLI, R., MONTECINOS, A., SEPULVEDA, H.H., VELOSO-AGUILA, D. "The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective". *International Journal of Climatology*. 2020, vol 40, p. 421– 439.
- GORE (GOBIERNO REGIONAL METROPOLITANO DE SANTIAGO). "Estrategia Regional para la Conservación de la Biodiversidad en la Región Metropolitana de Santiago 2015 – 2025". Santiago: *Andros Impresores*, 2014, 143 p.
- GÖKYER, E. "Understanding Landscape Structure Using Landscape Metrics". En Özyavuz, M. (Ed.). IntechOpen: London, 2013, pp. 663-676.
- GUO, M., LI, J., SHENG, C., XU, J., WU, L. "A review of wetland remote sensing". *Sensors*. 2017, vol 17, núm 4, 777.
- IDE (INFRAESTRUCTURA DE DATOS ESPACIALES). "Catastro de Uso de Suelo y Vegetación". 2019. [en línea] [fecha de la consulta: 21 de septiembre 2022]. Disponible en web: https://ide.minagri.gob.cl/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/%7BF8AE2DCFC-FB88-4760-82B7-B0F8D221EB4F%7D_100121_es
- LÓPEZ, R., FROHN, R. "Remote Sensing for landscape ecology: new metric indicators". Boca Raton: *CRC Press*. 2019, 269 p.
- LÓPEZ, R.D, LYON, J.G., LYON, L.K., LÓPEZ, D.K. "Wetland landscape characterization: practical tools, methods, and approaches for landscape ecology". Boca Raton: *CRC Press*, 2013, 308 p.
- LUEBERT, F., PLISCOFF, P. "Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile". Santiago: *Editorial Universitaria*, 2006, 384 p.
- MCGARIGAL, K. "Landscape pattern metrics". En Balakrishnan, N., Colton, T., Everitt, B., Piegorsch, W., Ruggeri, F., Teugels, J. L. (Eds.). Nueva York: *John Wiley & Sons*, 2014, pp. 1-13.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. "Ley de Humedales Urbanos 21.202 y su reglamento". 2020. [en línea] [fecha de la consulta: 21 de septiembre 2022]. Disponible en web: <https://humedaleschile.mma.gob.cl/humedales-urbanos/>
- ORELLANA, G. "Suprema acoge demanda por daño al humedal Batuco". *La Tercera*. 2019. [en línea] [fecha de la consulta: 21 de septiembre 2022]. Disponible en web: <https://www.latercera.com/pulso/noticia/suprema-acoge-demanda-dano-al-humedal-batuco/774909/>
- ORIMOLOYE, I.R., MAZINYO, S.P., KALUMBA, A.M., NEL, W., ADIGUN, A.I., OLOLADE, O.O.

“Wetland shift monitoring using remote sensing and GIS techniques: landscape dynamics and its implications on Isimangaliso Wetland Park, South Africa”. *Earth Science Informatics*. 2019, vol 12, p. 553–563.

OTERRA. “Plan de ordenamiento territorial para la conservación y uso sustentable de la Laguna Batuco”. Santiago: *Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA)*, 2010, 90 p.

PLATAFORMA URBANA. “Crecimiento de Lampa y el desafío por hacer mejor ciudad”. 2022. [en línea] [fecha de la consulta: 21 de septiembre 2022]. Disponible en web: <https://www.plataformaurbana.cl/archive/2012/04/12/crecimiento-de-lampa-y-el-desafio-por-hacer-mejor-ciudad/>

RAMSAR. “Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas”. París: *Oficina de Normas Internacionales y Asuntos Legales de la UNESCO*. 1971, 3 p.

RAMSAR. “Strategic framework and guidelines for the future development of the List of Wetlands of International Importance of the Convention on Wetlands (RSIS edition). 2007. [en línea] [fecha de la consulta: 21 de septiembre 2022]. Disponible en web: <https://www.ramsar.org/document/strategic-framework-and-guidelines-for-the-future-development-of-the-list-of-wetlands-of-1>

RIVAS-MARTÍNEZ, S., RIVAS-SÁENZ, S. “Sistema de clasificación bioclimática mundial”. 1996. [en línea] [fecha de la consulta: 21 de septiembre 2022]. Disponible en web: <http://www.ucm.es/info/cif>

SEGUEL, C. “Ciudades satélites en Lampa, Santiago: un caso de co-gobierno urbano entre el municipio y holdings inmobiliarios”. *Cuadernos Geográficos*. 2016, vol 55, núm 2, pp. 265-281.

SIMEF. “Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Forestales Nativos de Chile”. 2019. [en línea] [fecha de la consulta: 21 de septiembre 2022]. Disponible en web: <https://simef.minagri.gob.cl/>

SONG, K., WANG, Z., LI, L., TEDESCO, L., LI, F., JIN, C., DU, J. “Wetlands shrinkage, fragmentation and their links to agriculture in the Mulenge Xingkai

Plain, China”. *Journal of Environmental Management*. 2012, vol 111, p. 120-32.

THE NATURE CONSERVANCY. “Plan de conservación del Humedal de Batuco, 2018-2023”. Santiago: *Fundación San Carlos de Maipo*, 2019, 196 p.

WANG, Y., HONG, W., WU, C., HE, D., LIN, S., FAN, H. “Application of landscape ecology to the research on wetlands”. *Journal of Forestry Research*. 2008, vol 19, núm 2, p. 164–170.

WEATHER SPARK. “The Weather Year Round Anywhere on Earth”. 2022. [en línea] [fecha de la consulta: 21 de septiembre 2022]. Disponible en web: <https://weatherspark.com/>

XU, K., KONG, C., LIU, G., WU, C., DENG, H., ZHANG, Y., ZHUANG, Q. “Changes of urban wetlands in Wuhan, China, from 1987 to 2005”. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 2010, vol 34, núm 2, p. 207-220.