



ARTÍCULO 1

**EFFECTOS DE LA EXPANSIÓN URBANA EN LA
REDUCCIÓN DE LA CALIDAD AMBIENTAL DEL
HUMEDAL ROCUANT ANDALIÉN ENTRE 2004 y 2022**

EFFECTOS DE LA EXPANSIÓN URBANA EN LA REDUCCIÓN DE LA CALIDAD AMBIENTAL DEL HUMEDAL ROCUANT ANDALIÉN ENTRE 2004 Y 2022



Ignacio Canales Toledo^{1*} y María Elgueta Astaburuaga²

RESUMEN: En este estudio se analiza el impacto de la urbanización en la calidad ambiental del humedal Rocuant-Andalién entre 2004 y 2022. La metodología incluye la estimación de la reducción de superficie mediante imágenes satelitales Landsat para los años 2004, 2010, 2016 y 2022, y la estimación de cambios en la calidad ambiental a través de un análisis multicriterio. Este trabajo complementa el análisis realizado por Smith y Romero (2009) para el Área Metropolitana de Concepción (AMC) en el periodo 1975–2004, permitiendo dar seguimiento a la tendencia de deterioro ambiental asociada al avance urbano observada por dichos autores.

Los resultados muestran una disminución sostenida, tanto de la superficie como de la calidad ambiental hacia la zona sur del humedal, aunque la pérdida de superficie no siempre es proporcional al deterioro. La tendencia general de deterioro ambiental observada entre 1975–2004 persiste entre el 2004 y 2022, pero no es constante. Comparando con los hallazgos de Smith y Romero, se evidenció que las tendencias fueron distintas, y se identificó a la década del 2000 como la de mayor deterioro.

Se concluyó que, aunque la reducción de superficie incide en la calidad ambiental, esta relación no siempre es proporcional, pues también intervienen otras variables como el patrón de urbanización, factores climáticos, entre otros. Por otro lado, si bien la tendencia de deterioro se ha desacelerado, la degradación podría intensificarse nuevamente debido a la falta de protección legal y a la clasificación de gran parte del humedal como urbanizable en el Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC). Su conservación es clave por los servicios ecosistémicos esenciales que aporta, esenciales para la calidad de vida urbana.

Palabras claves: Humedal, Área Metropolitana de Concepción, Calidad ambiental, Urbanización, Servicios ecosistémicos, Impermeabilización de suelos.

1. Geógrafo, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6490-7433>

2. Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3746-0049>

* AUTOR CORRESPONDIENTE
icanales.tol@gmail.com;
icanales2016@udec.cl

ABSTRACT: This study analyzes the impact of urbanization on the environmental quality of the Rocuant-Andalién wetland between 2004 and 2022. The methodology includes estimating the reduction of wetland area using Landsat satellite images for the years 2004, 2010, 2016, and 2022, and assessing changes in environmental quality through a multicriteria analysis. This work complements the study conducted by Smith and Romero (2009) for the Metropolitan Area of Concepción (AMC) during the period 1975–2004, allowing for continued monitoring of the trend of environmental degradation linked to urban expansion observed by those authors.

The results show a sustained decrease in both wetland area and environmental quality, particularly in the southern sector, although the loss of area is not always proportional to the level of degradation. The general trend of environmental deterioration identified between 1975 and 2004 persists during 2004–2022 but is not constant. Compared with the findings of Smith and Romero, different trends were observed, with the 2000s identified as the decade of greatest deterioration.

It was concluded that although the reduction in area affects environmental quality, this relationship is not always proportional, as other factors such as urbanization patterns and climatic variables also play a role. Furthermore, although the deterioration trend has slowed, degradation could intensify again due to the lack of legal protection and the classification of much of the wetland as developable land under the Concepción Metropolitan Regulatory Plan (PRMC). Conserving this wetland is crucial because of the ecosystem services it provides, which are essential for urban quality of life.

Keywords: Wetland, Concepción Metropolitan Area, Environmental quality, Urbanization, Ecosystem services, Soil impermeabilization.

INTRODUCCIÓN

Desde los orígenes de la civilización, los humedales han sido fundamentales para el desarrollo humano, proveyendo servicios ecosistémicos clave como la regulación del ciclo hídrico, la mitigación de inundaciones y el mantenimiento de la biodiversidad (McInnes, 2008, citado en McInnes, 2010). Sin embargo, no todas las sociedades valoraron su rol ecológico: civilizaciones como la romana los consideraron terrenos improductivos a transformar, una visión antropocéntrica que persiste y contribuye a su degradación (Estrabón, 1924; Sepúlveda & Torres, 2021).

A nivel mundial, la pérdida de humedales es alarmante, alcanzando entre 64% y 71% en el último siglo (Ramsar, 2018), con los humedales costeros sometidos a mayor presión debido a su ubicación estratégica y la intensa urbanización de las zonas litorales (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Esta transformación implica procesos como el relleno de suelos, la impermeabilización y la fragmentación de hábitats, afectando su función como amortiguadores naturales ante fenómenos extremos (Sekovski et al., 2011).

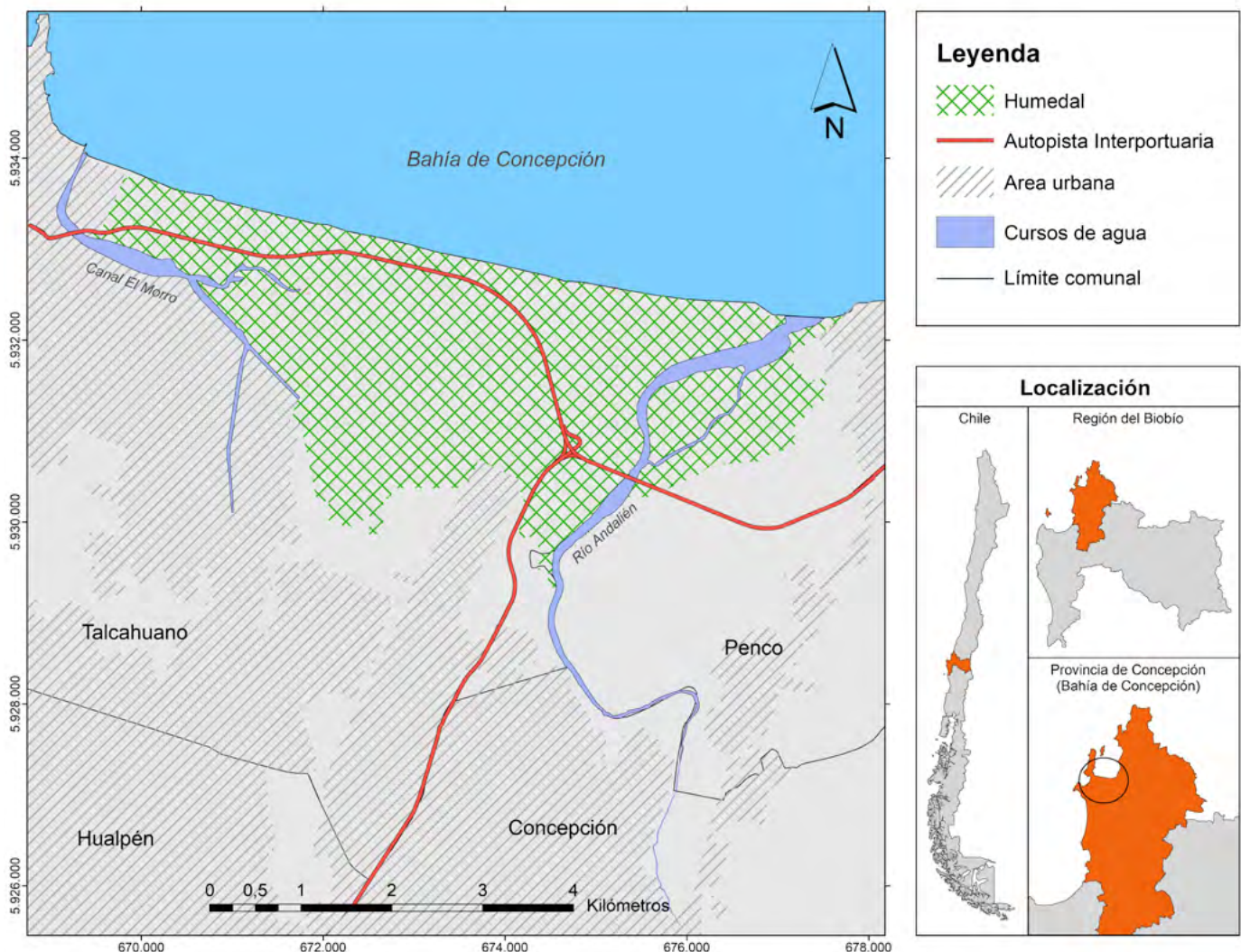
En Chile, se estima la existencia de alrededor de 40 mil humedales, conformando 5,6 millones de hectáreas aproximadamente. Sin embargo, menos de la mitad cuentan con algún nivel de protección formal (MMA, 2020). Instrumentos como la Convención Ramsar o la Ley de Humedales Urbanos (Ley 21.202) han avanzado en su reconocimiento legal, pero su aplicación enfrenta múltiples desafíos, incluyendo limitaciones técnicas y la presión de proyectos inmobiliarios e industriales sobre terrenos privados (Del Fierro, 2024; Navarro, 2017).

Un caso paradigmático es el humedal Rocuant-Andalién, ubicado en la costa sur de la bahía

de Concepción, entre las comunas de Penco y Talcahuano dentro del Área Metropolitana de Concepción (AMC) (Figura 1), la segunda conurbación más grande de Chile (INE, 2017). Este humedal costero combina características estuarinas y ribereñas: se alimenta del estuario de la desembocadura del río Andalién y de planicies inundables aledañas a su cauce (DGA, 2004). Su origen se relaciona con paleo-depósitos fluviales del río Biobío y procesos de regresión marina que generaron un extenso sistema de humedales costeros, actualmente fragmentado por la expansión urbana (Martínez et al., 2019; MMA, GEF & PNUMA, 2020).

» **Figura 1:** Área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



Desde el punto de vista ecológico, el humedal Rocuant-Andalién destaca como uno de los sitios más importantes de la Región del Biobío para la biodiversidad y es el segundo más relevante a nivel nacional como sitio de paso y anidación para aves migratorias, como la gaviota de Franklin (*Leucophaeus pipixcan*), el rayador (*Rynchops niger cinerascens*) y el zarapito (*Numenius phaeopus hudsonicus*), entre otras (MMA, GEF & PNUMA, 2020). Además, alberga especies nativas de anfibios, reptiles, peces y mamíferos, algunas endémicas, que dependen de su conectividad hidrológica y de la calidad de sus parches vegetales para sobrevivir (Romero et al., 2001). A esto se suma su rol como barrera natural frente a tsunamis, como evidenció el terremoto y tsunami de 2010, donde su saturación impidió la penetración de olas hacia zonas habitadas (Rojas et al., 2019).

Pese a su relevancia ambiental, la fuerte presión urbanística amenaza su integridad ecológica y funcional, impulsada por la zonificación del Plan Regulador Metropolitano de Concepción que destina más de la mitad de su superficie a usos urbanos (Figura 2), fragmentando hábitats y promoviendo la impermeabilización de suelos. Esta situación se refleja en la tendencia documentada por Smith y Romero (2009) para el periodo 1975–2004, en donde

se evidenció un deterioro significativo en la calidad ambiental del humedal.

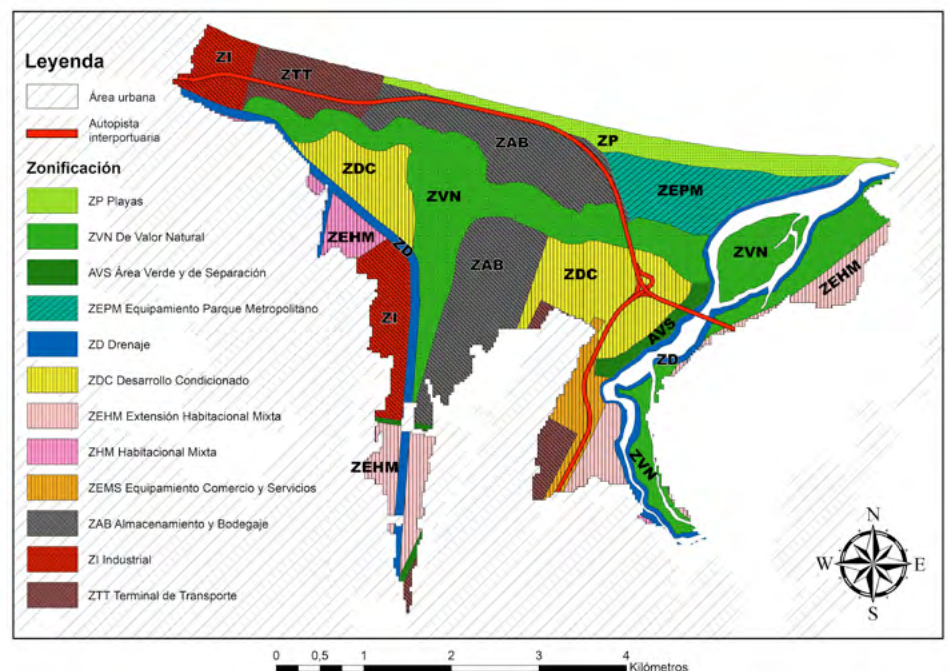
La pérdida de calidad ambiental en humedales conlleva además una merma directa en los servicios ecosistémicos que estos proveen, como la regulación hídrica, la protección frente a inundaciones y la mantención de hábitats críticos para la biodiversidad. De ahí la relevancia de evaluar la evolución de su estado ecológico frente a la presión urbana (Ramsar, 2018).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo principal analizar cómo la expansión urbana del AMC entre 2004 y 2022 ha influido en la extensión y calidad ambiental del humedal Rocuant-Andalién. Específicamente, se busca identificar los patrones espaciales y temporales de urbanización sobre el humedal, cuantificar los cambios recientes en su estado ecológico y contrastarlos con las tendencias históricas descritas previamente, aportando evidencia empírica que fundamente la necesidad de fortalecer su protección legal y su integración en la planificación territorial. Para ello, se combinan técnicas de teledetección, análisis multicriterio y estadística descriptiva, proponiendo una aproximación que permita reconocer las zonas más afectadas debido a las presiones urbanas crecientes en la zona.

RG18

» **Figura 2:** Zonificación del PRMC en el humedal.

Fuente: Elaboración propia basada en información de IDE MINVU.



METODOLOGÍA

Enfoque metodológico

El presente estudio evalúa la pérdida de superficie y la disminución de la calidad ambiental del humedal Rocuant-Andalién como consecuencia de la expansión del AMC durante el periodo 2004-2022. Para ello, se estimó la pérdida de superficie combinando fotointerpretación y análisis de variables espectrales a partir de imágenes satelitales Landsat, y se determinó la evolución de la calidad ambiental mediante un análisis multicriterio multitemporal de ocho factores ambientales, replicando el enfoque metodológico propuesto por Smith y Romero (2009). La comparación de resultados permitió identificar cambios y contrastar tendencias con el periodo 1975-2004. Se trabajaron cuatro cortes temporales (2004, 2010, 2016 y 2022) complementados con dos visitas a terreno para verificación fotográfica y recopilación de información cualitativa.

Pérdida de superficie de humedal

La superficie del humedal se delimitó siguiendo la "Guía de delimitación y caracterización de humedales urbanos de Chile" (MMA, 2022), considerando tres criterios principales: presencia de agua superficial, suelos saturados y vegetación hidrófita:

- **Agua superficial:** Detectada con el Índice Diferencial Normalizado de Agua Modificado (MNDWI), que permite resaltar cuerpos de agua. Se calculó con la fórmula $((B_2 - B_5) / (B_2 + B_5))$ y fueron considerados valores superiores a 0,5.
- **Vegetación hidrófita:** Detectada con el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI), que indica verdor y salud de la vegetación. Se calculó como $((NIR - Red) / (NIR + Red))$ y fueron considerados valores superiores a 0,15.
- **Suelos saturados:** Se detectaron con el Índice de Humedad Diferencial Normalizado (NDMI), que mide humedad del suelo y vegetación. Se calculó como $((NIR - SWIR) / (NIR + SWIR))$ y fueron considerados valores superiores a 0.

La presencia conjunta de estos elementos permitió identificar zonas de humedal, corroboradas mediante análisis visual. Se estimaron las diferencias de superficie total y por tipo de uso de suelo entre los cuatro años estudiados.

Análisis de Calidad Ambiental

La calidad ambiental del humedal se estimó mediante un análisis multicriterio con ocho factores, utilizando las ponderaciones propuestas por Smith y Romero (2009), definidas a través de un proceso analítico jerárquico basado en juicio de expertos. Dichas ponderaciones se consideraron pertinentes, ya que el estudio original también incluyó al humedal Rocuant-Andalién junto con otros humedales de la zona.

A continuación, se detalla cada factor y como se calcularon:

- **Humedad del suelo:** Estimado mediante el Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI). R19
- **Verdor:** Estimado mediante el Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI).
- **Tasa de permeabilidad por uso de suelo:** Determinada por los porcentajes de impermeabilización calculados por Smith (2007) y aplicados a las coberturas del Catastro Vegetacional de CONAF. La escala fue normalizada inversamente, de modo que los valores reflejan tasas de permeabilidad.
- **Tamaño de los parches vegetales:** Corresponden a fragmentos del humedal resultantes de la construcción de infraestructura. Su superficie fue calculada mediante fotointerpretación de imágenes satelitales y se asumió que, a mayor área, mayor calidad ambiental. Las zonas urbanizadas dentro del polígono de estudio fueron asignadas con valor cero, al haber dejado de formar parte del sistema natural.

• **Factores de proximidad (distancia a la ciudad, caminos y vías, cuerpos de agua, y cursos de agua):** Calculados mediante mapas de proximidad, se midió como la cercanía de cada píxel del humedal a cada elemento medido por estos factores. La distancia a la ciudad y distancia a los caminos y vías principales se consideraron factores negativos, ya que una mayor cercanía de estos elementos al humedal implica una mayor presión antrópica sobre este y, por lo tanto, una menor calidad ambiental. En contraste, la distancia a cuerpos de agua y la distancia a cursos de agua superficiales se consideraron factores positivos, ya que una mayor cercanía favorece la conectividad hidrológica y, con ello, una mayor calidad ambiental.

Todos los factores se rasterizaron y estandarizaron a una escala común adimensional de 1 (mínima calidad) a 3 (máxima calidad) mediante una ecuación lineal ajustada a los valores extremos de cada variable. Luego, se aplicaron las ponderaciones específicas a cada factor y se calculó una suma ponderada por píxel para estimar los niveles de calidad ambiental. Estos resultados fueron clasificados en cinco categorías: muy baja, baja, media, alta y muy alta, definidas a partir del promedio y la desviación estándar del año base (2004). Esta categorización difiere del estudio de Smith y Romero (2009), que consideró solo cuatro niveles de calidad ambiental.

» **Figura 2:** Ponderaciones y unidades de medida de los factores de calidad ambiental.

Fuente: Elaboración propia basada en metodología de Smith & Romero (2009).

FACTOR	PESO ASIGNADO	UNIDAD DE MEDIDA ORIGINAL
Humedad del suelo (NDWI)	0,121	Escala NDWI (-1 a 1)
Verdor (NDVI)	0,150	Escala NDVI (-1 a 1)
Tasa de permeabilidad	0,1473	Porcentaje (%)
Tamaño de parches vegetales	0,1043	Hectáreas (ha)
Distancia a la ciudad	0,1344	Metros (m)
Distancia a caminos principales	0,124	Metros (m)
Distancia a cuerpos de agua	0,104	Metros (m)
Distancia a cursos de agua	0,115	Metros (m)

RG10

RESULTADOS

Pérdida de superficie del humedal

Entre 2004 y 2022, el humedal Rocuant-Andalién perdió un total de 411,44 hectáreas, equivalente al 20,36% de su superficie inicial (Figura 3 y Tabla 2). La reducción se concentró principalmente en la zona sur y poniente, correspondiente al territorio de Talcahuano, impulsada por la expansión de complejos residenciales como Brisas del Sol, San Andrés del Valle y barrios San Marcos, junto con procesos de

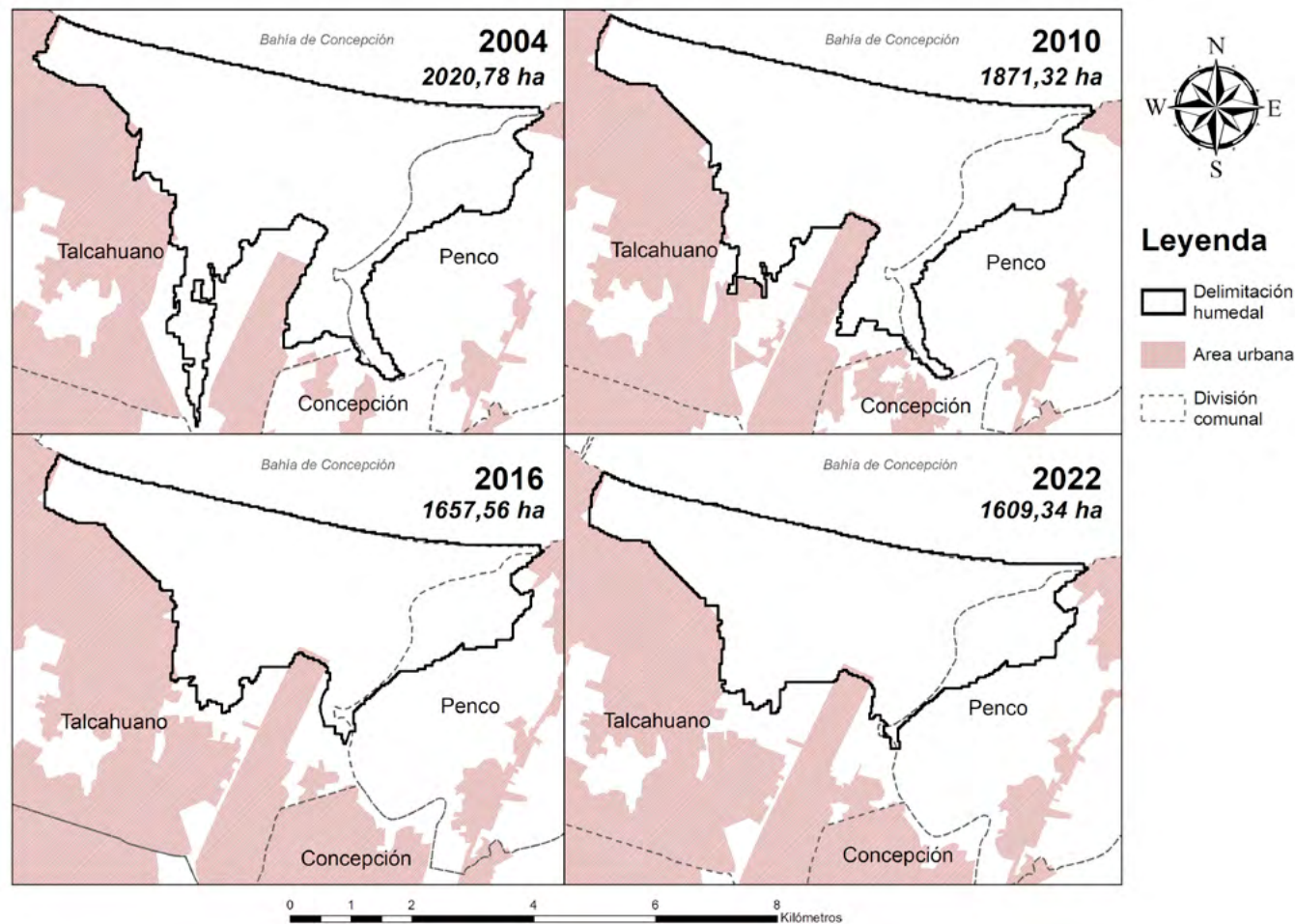
densificación en Salinas y el Parque Industrial. El subperíodo de mayor pérdida fue 2010-2016, cuando desapareció más del 10% de la superficie inicial y más del 50% del total perdido en todo el período, lo que estuvo estrechamente relacionado con el avance de rellenos urbanizables y rurales, principalmente en la zona sur-oriente del humedal, en la intersección entre Talcahuano y Penco.

En contraste, entre 2016 y 2022 la tasa de reducción fue más moderada, dominada por la urbanización en rellenos ya existentes en subperiodos anteriores, sumado a la generación de otros nuevos suelos rellenados.

El margen oriental, correspondiente a la comuna de Penco, se vio menos afectado debido a la presencia de barreras topográficas (zona con altos cerros alrededor del río Andalién) y al predominio de usos agrícolas y forestales.

» **Figura 3:** Cambios en el tamaño del humedal y superficie urbanizada entre 2004 y 2022.

Fuente: Elaboración propia.



» **Tabla 2:** Superficie total y pérdida del humedal.

Fuente: Elaboración propia.

AÑO	SUPERFICIE TOTAL (HA)	SUPERFICIE PERDIDA (HA)	SUPERFICIE PERDIDA ACUMULADA (HA)	SUPERFICIE PERDIDA ACUMULADA (%)
2004	2020,78	-	-	-
2010	1871,32	149,46	149,46	7,40%
2016	1657,56	213,76	363,22	17,97%
2022	1609,34	48,22	411,44	20,36%

Disminución de la calidad ambiental

La calidad ambiental promedio del humedal disminuyó en un 15,9% en el período 2004–2022, con la mayor caída concentrada entre 2004–2010 (–8,2%). Este deterioro inicial coincidió principalmente con la construcción de la autopista interportuaria (2005) que acercó la intervención antrópica a zonas interiores del humedal, lo fragmentó en tres parches principales y redujo su conectividad ecológica. A esto se le sumó el desarrollo de nuevos complejos habitacionales en la zona sur y poniente en la comuna de Talcahuano ya mencionados anteriormente.

Posteriormente, entre 2010 y 2022, la disminución de la calidad fue más gradual, atribuida exclusivamente al avance urbano desde el sector sur y a los factores de calidad ambiental asociados —reducción progresiva de parches vegetales y permeabilización de suelos y una mayor proximidad a infraestructuras

urbanas—, sin la adición de nuevos elementos al interior del humedal con un impacto comparable al de la autopista interportuaria.

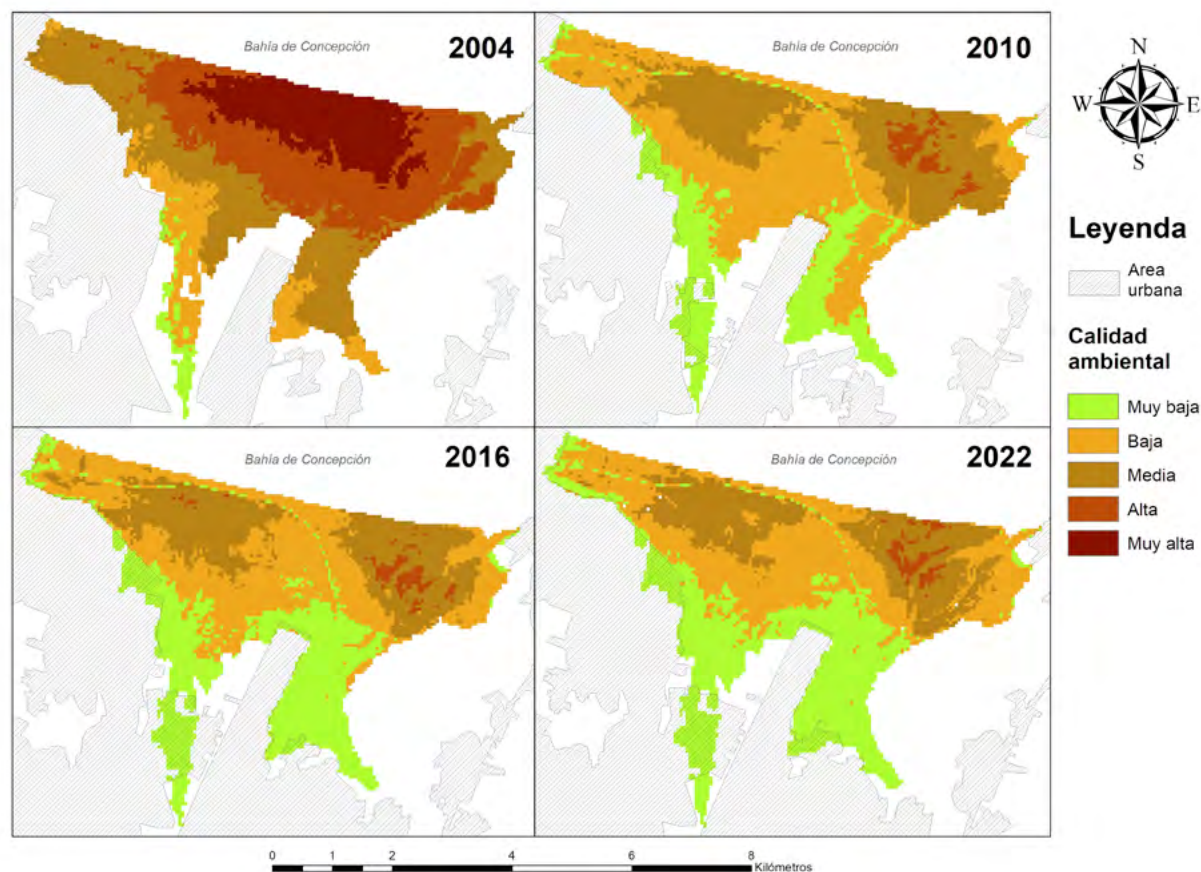
La zona con mayor calidad ambiental se mantuvo en el sector norte, más alejado del área urbana y próximo a los cursos de agua (río Andalién y el canal El Morro). Sin embargo, a partir de 2010, esta zona de mayor calidad ambiental quedó dividida en dos fragmentos por el trazado de la autopista. En contraste, el sector sur registró la degradación más intensa, vinculada a la expansión urbana consecuencia de su proximidad al centro urbano del AMC.

En términos de distribución espacial de las categorías de calidad, en 2004 existían áreas de calidad muy alta que desaparecieron por completo en 2010. Las áreas de calidad alta se redujeron a un 3% del total en el mismo año y, para 2022, las áreas de calidad baja y muy baja concentraban el 70% de la superficie del humedal (Figura 4 y Tabla 3).

» **Figura 4:** Evolución de la calidad ambiental en el humedal.

Fuente: Elaboración propia.

RG|12



» **Tabla 3:** Superficie ocupada por nivel de calidad.

Fuente: Elaboración propia.

CALIDAD AMBIENTAL	2004	2010	2016	2022
MUY ALTA	361,5	0	0	0
ALTA	632,75	57	41	37,25
MEDIA	678,75	596,75	535,25	476,5
BAJA	253,25	865,75	742,75	723
MUY BAJA	59	436	648	732

Evolución de factores de calidad ambiental

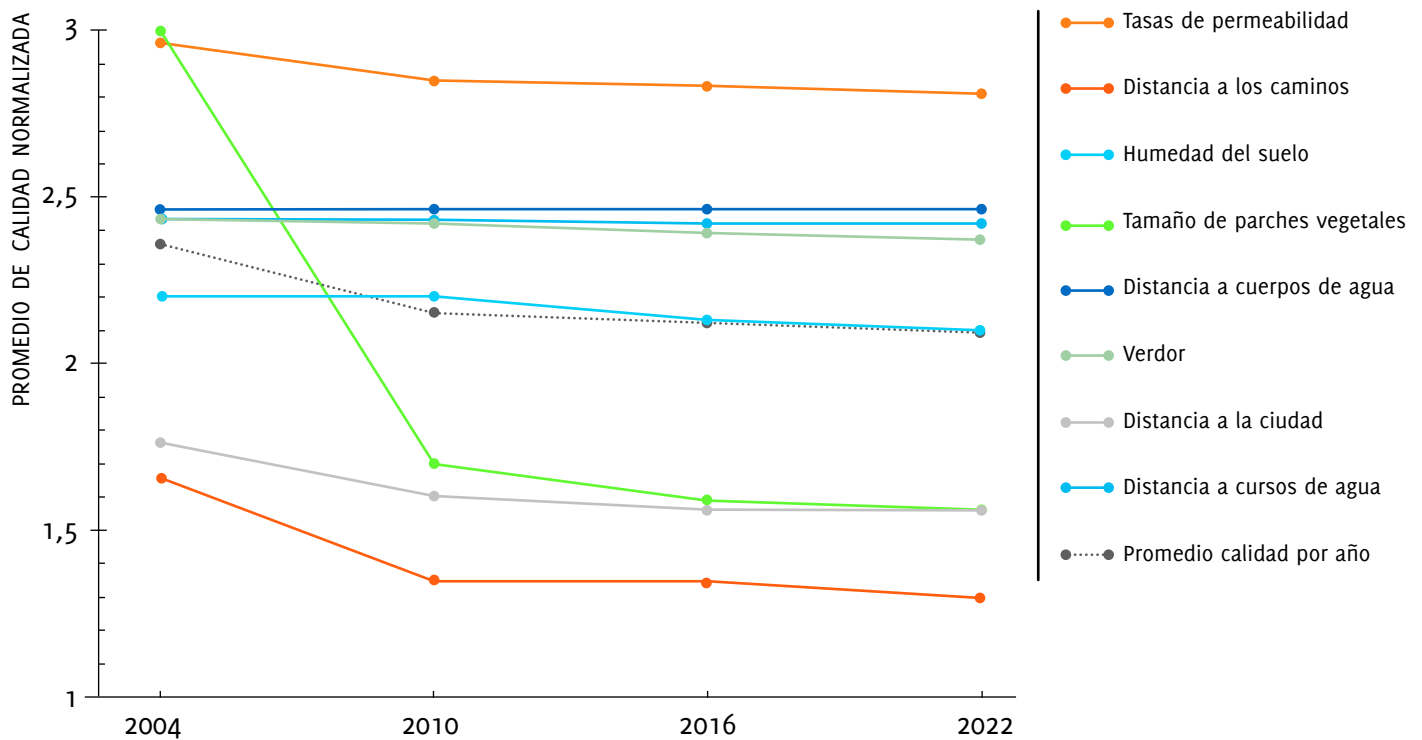
La evolución de los ocho factores ponderados a lo largo del período de estudio fue heterogénea, lo que justifica su análisis individual para identificar los factores que más influyen en la calidad ambiental. El cambio más significativo correspondió al tamaño de parches, cuyo valor promedio disminuyó cerca de un 50 %, reflejando la fragmentación provocada por la autopista interportuaria. También se registraron variaciones relevantes en los factores distancia a caminos, distancia a ciudad y permeabilidad del suelo, todos vinculados al avance de la urbanización. En contraste, la humedad del suelo y el verdor presentaron descensos más suaves, mientras que la distancia a cursos y cuerpos de agua permaneció estable, debido a que las principales aproximaciones urbanas a estos reservorios se produjeron antes de 2004.

Durante el subperíodo 2004-2010, que concentra el mayor deterioro de la calidad ambiental, se produjeron también los cambios más marcados en varios factores. La construcción de la autopista interportuaria fragmentó el humedal, pasando de un parche vegetal continuo a tres, y redujo de forma significativa la distancia a vías. A esto se sumó el avance urbano desde la zona sur, que acortó la distancia a la ciudad y aumentó la impermeabilización del suelo, generando un impacto conjunto que explica gran parte del deterioro registrado en esta etapa.

A partir de 2010, el deterioro fue más gradual y estuvo asociado a variaciones persistentes pero moderadas en comparación al primer subperíodo, principalmente en los factores de tamaño de parches vegetales, distancia a la ciudad, distancia a caminos, y permeabilidad del suelo.

» **Figura 5:** Comportamiento individualizado de los factores de calidad ambiental.

Fuente: Elaboración propia.



Relación entre pérdida de superficie y calidad

El subperíodo de mayor disminución de calidad ambiental, 2004–2010, no se condice con el de mayor pérdida de superficie de humedal, 2010–2016 (Tabla 4). La gran caída en la calidad ambiental observada entre 2004–2010 se debe, principalmente, a la construcción de la autopista interportuaria y al impacto que tiene sobre los factores considerados en la estimación de dicha calidad (Ver Figura 4 y 5). El método utilizado considera entre sus factores el tamaño de los parches vegetales, el que se ve afectado significativamente por la fragmentación que produce la interportuaria. Por otra parte, el método considera la distancia a caminos, factor

que también se ve afectado significativamente por la construcción de una carretera en medio del humedal. El factor distancia a ciudades, también considerado en el método, no depende solo del tamaño del área urbanizada, sino que se ve influenciado también por el patrón de urbanización (por ej., concentración o dispersión), el que no es igual en todos los subperiodos analizados. De esta forma, la reducción de la distancia promedio a la ciudad es más pronunciada entre 2004 y 2010, en que la urbanización se concentra hacia el interior del humedal, que entre 2010–2016, cuando hubo una urbanización más extensiva, pero con un patrón más disperso que significó una incidencia antrópica en el humedal comparativamente menor.

RI 14

» **Tabla 4:** Relación entre pérdida de superficie y calidad ambiental.

Fuente: Elaboración propia.

SUBPERIODO	SUPERFICIE DISPONIBLE (%)	CALIDAD PROMEDIO DISPONIBLE (%)	PORCENTAJE DE DETERIORO ACUMULADO
2004–2010	92,6	91,08	8,16
2010–2016	82,03	89,58	14,19
2016–2022	79,64	88,79	15,78

Comparación histórica (1975–2022)

En relación con el período 1975–2004, la tasa anual de pérdida de humedales de alta calidad entre 2004–2022 fue 1,7 veces mayor. Sin embargo, el patrón temporal difirió: antes de 2004 la pérdida se intensificaba progresivamente, mientras que después de 2004 se concentró en los primeros seis años para luego atenuarse (Tabla 5).

La pérdida anual de superficie durante el período 1975–2001 se mantuvo relativamente estable, en

torno a 40 ha/año, con un incremento gradual a lo largo de estos años. Entre 2001 y 2004, la tasa de pérdida se quintuplicó, evidenciando un aumento abrupto respecto al subperíodo anterior. Posteriormente, entre 2004 y 2016, la reducción de superficie se moderó, registrándose ascensos graduales en la tasa anual, los cuales continuaron hasta 2022, año en que la pérdida anual representó apenas una cuarta parte del valor observado en el subperíodo previo (Figura 6).

» **Tabla 4:** Reducción porcentual de áreas de máxima calidad ambiental: 1975-2004 vs 2004-2022.

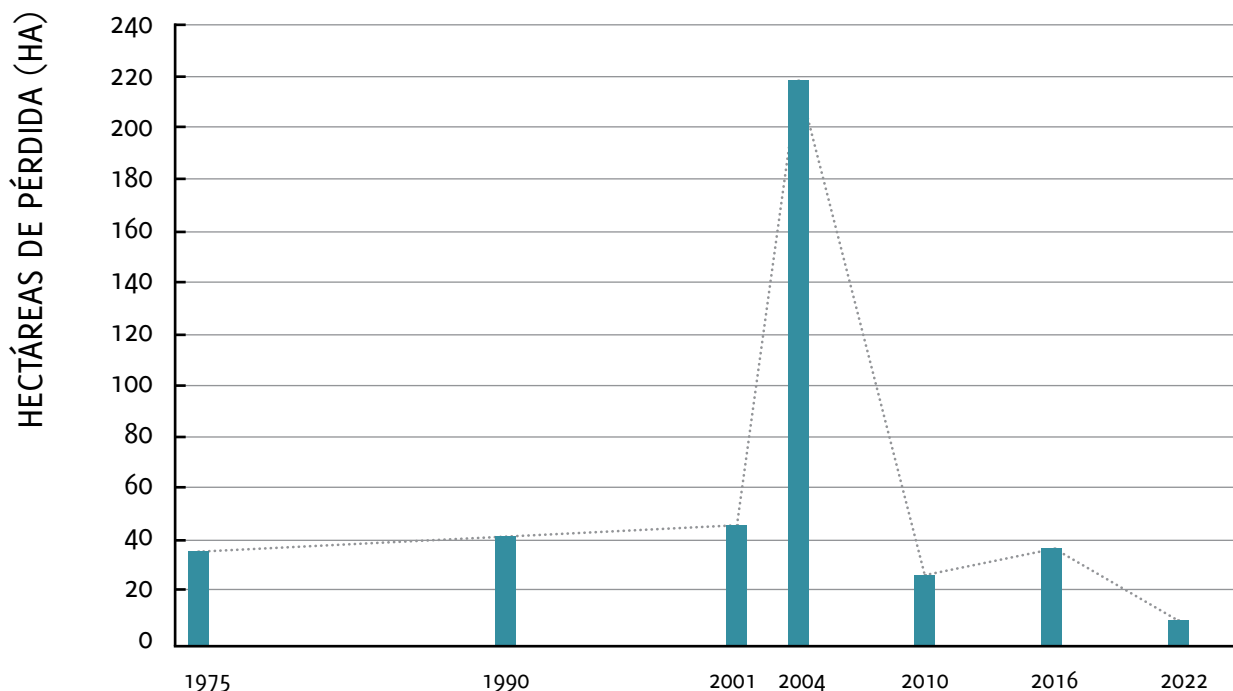
Fuente: Datos de 1975-2004 por Smith & Romero (2009). Datos de 2004-2022 de elaboración propia.

PERIODO	PORCENTAJE DE PÉRDIDA (%)	TASA ANUAL DE PÉRDIDA (%)
1975–2004	87,5	3,02
2004–2022	96,23	5,35

RI 15

» **Figura 6:** Tasa de pérdida de humedal: Comparación entre periodos 1975-2004 y 2004-2022.

Fuente: Datos de 1975-2004 por Smith & Romero (2009). Datos de 2004-2022 de elaboración propia.



DISCUSIÓN

La sostenida expansión urbana del Área Metropolitana de Concepción continúa afectando el humedal Rocuant-Andalién, un ecosistema que permanece vulnerable sin una protección oficial bajo la Ley 21.202. Aunque la tasa de pérdida de humedales de alta calidad fue 1.7 veces mayor que en el periodo anterior (1975–2004), el análisis reveló un patrón complejo de deterioro. La intensidad de la degradación se desaceleró a partir de 2010, lo que podría indicar un cambio en las dinámicas de urbanización, como un desplazamiento del desarrollo o una fase de consolidación de usos de suelo menos agresiva. Sin embargo, esta desaceleración no disminuye el riesgo latente de una futura aceleración del desarrollo.

Un hallazgo crucial es que la pérdida de superficie y la disminución de la calidad ambiental no son siempre proporcionales. El desfase temporal entre el periodo de mayor pérdida de superficie (2010–2016) y el de mayor caída de calidad (2004–2010) subraya que los factores de fragmentación, como la construcción de la autopista interportuaria, pueden tener un impacto más significativo en el deterioro que la mera conversión de suelo. A pesar de este evento atípico, la urbanización en la zona sur sigue siendo el principal foco de presión antrópica debido a su proximidad al núcleo urbano de Concepción.

La calidad ambiental, entendida en este estudio como un índice multicriterio basado en factores biofísicos y espaciales, representa una aproximación operativa útil para evaluar la vulnerabilidad del humedal frente a la urbanización. Sin embargo, existen múltiples formas de conceptualizar este término. En la literatura, se han empleado indicadores centrados en la calidad del agua (nutrientes, contaminantes, turbidez), en la biodiversidad (riqueza y abundancia de especies) o en percepciones sociales de bienestar asociado al ecosistema (USEPA, 2002; Millenium Ecosystem Assessment, 2005). En este sentido, la

definición utilizada aquí captura principalmente las presiones territoriales y la fragmentación ecológica analizada a través de la teledetección, pero no refleja directamente aspectos biogeoquímicos ni socioculturales de la calidad ambiental.

Es importante reconocer también los factores que no pudieron ser considerados por limitaciones metodológicas. Entre ellos destacan la contaminación hídrica difusa y puntual, la introducción de especies exóticas invasoras, la disminución de biodiversidad específica, la presión antrópica asociada a actividades recreativas e industriales y la presencia de microbasurales (Mitsch & Gosselink, 2015; Zedler & Kercher, 2004; Davidson, 2014). Todos estos aspectos influyen de manera significativa en la calidad ambiental, pero requieren de mediciones in situ y de series temporales específicas que exceden los alcances de este estudio.

Aspectos metodológicos y sugerencias futuras

El estudio identificó varias limitaciones, principalmente la resolución espacial de 30 metros de las imágenes Landsat. Para futuros trabajos, se recomienda usar imágenes Sentinel-2 con una resolución de 10 metros, ideales para periodos posteriores a 2015.

Para mejorar la precisión, sería beneficioso complementar la metodología con análisis en las estaciones húmeda y seca, ya que los índices espectrales (NDVI y NDWI) son sensibles a la variabilidad estacional.

Finalmente, la tendencia de deterioro resalta la importancia de un monitoreo continuo. Este debería combinar la teledetección con la identificación in situ de microbasurales, que pueden no ser detectados por teledetección en áreas que la misma metodología clasifica como de buena calidad ambiental.



CONCLUSIONES

Esta investigación ha proporcionado una visión actualizada del estado del humedal Rocuant-Andalién, demostrando que, a pesar del deterioro acumulado, se observa una desaceleración en la pérdida de su calidad ambiental. Los hallazgos revelan que el impacto de la urbanización no se limita a la pérdida de superficie, sino que la fragmentación por infraestructura puede ser un factor de degradación igualmente crítico. Estos resultados refuerzan la urgencia de preservar este ecosistema, no solo por su papel vital en la regulación climática y la mitigación de riesgos naturales para el Gran Concepción, sino también por la conservación de su biodiversidad. Además, la reducción de la calidad ambiental compromete la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para la resiliencia y calidad de vida del Área Metropolitana de Concepción, tales como la regulación climática, la retención de agua y el soporte a la biodiversidad local y migratoria (Ramsar, 2018). Para una gestión efectiva, se recomienda un monitoreo continuo e interdisciplinario que combine la teledetección con mediciones in-situ, como la detección de microbasurales, y la participación activa de la comunidad para obtener una comprensión más completa de sus dinámicas socioambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carlson, T., & Ripley, D. (1997). *On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index*. Obtenido de Remote Sensing of Environment 62: https://www.researchgate.net/publication/223708015_On_the_Relation_between_NDVI_Fractional_Vegetation_Cover_and_Leaf_Area_Index
- Convención Ramsar. (2018). *Perspectiva Mundial Sobre los Humedales*. Obtenido de Estado de los Humedales del Mundo y de los Servicios que Prestan a las Personas 2018: https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/gwo_s.pdf
- Davidson, N. (2014). *How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area*. Obtenido de Marine and Freshwater Research: https://www.researchgate.net/publication/266388496_How_much_wetland_has_the_world_lost_Long-term_and_recent_trends_in_global_wetland_area
- Del Fierro, M. (2024). *Los principales desafíos que enfrenta la Ley 21.202, sobre protección de humedales urbanos*. Obtenido de Revista chilena de la administración del Estado Nº 10: <https://revista.ceacgr.cl/index.php/revista/article/view/174>
- DGA. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Andalién*. Obtenido de <https://web.archive.org/web/20190410133821/https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Andalien.pdf>
- Estrabón. (ca. siglo I a.C./1924). *The Geography of Strabo*. Obtenido de With an English Translation By Horace Leonard Jones. V Volume.: <https://ia902706.us.archive.org/15/items/geographyofstrabo5strauoft/geographyofstrabo5strauoft.pdf>
- Gao, B.-C. (1996). *NDWI - A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space*. Obtenido de https://www.academia.edu/719962/NDWI_A_Normalized_Difference_Water_Index_for_Remote_Sensing_of_Vegetation_Liquid_Water_From_Space
- IDE MINVU. (s.f.). *Plan Regulador Metropolitano de Concepción*. Obtenido de <https://ide.minvu.cl/>
- INE. (2017). *Resultados Censo 2017*. Obtenido de <http://resultados.censo2017.cl/Region?R=Ro8>
- Martínez, C., Hidalgo, R., Henríquez, C., Arenas, F., Rangel-Buitrago, N., & Contreras-López, M. (2019). *La Zona Costera en Chile: Adaptación y Planificación para la Resiliencia*. Obtenido de Efectos Volcánicos en Concepción, Chile. Cambios Naturales en el Drenaje del Río Biobío: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/124138>
- McInnes, R. (2010). *Urban development, biodiversity and wetland management: Expert workshop report*. Obtenido de Ramsar: <https://mirror.unhabitat.org/downloads/docs/ExpertWorkshopWetlands.pdf>

- Millennium Ecosystem Assessment . (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water*. Obtenido de A Report of the Millennium Ecosystem Assessment : <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). *Inventario Nacional de Humedales*. Obtenido de <https://humedaleschile.mma.gob.cl/inventario-humadales/>
- Mitsch, W., & Gosselink, J. (2015). *Wetlands*. Obtenido de Fifth edition: https://archive.org/details/Wetlands_5th_Edition_by_William_J._Mitsch_James_G._Gosselink/page/466/mode/2up
- MMA. (2022). *Ministerio del Medio Ambiente*. Obtenido de Humedales Chile: <https://humedaleschile.mma.gob.cl/humedales-urbanos/>
- MMA/GEF/PNUMA. (2020). *Resumen de información territorial del sistema humedal Rocuant - Andalién, Vasco da Gama, Paicaví, Tucapel Bajo en las comunas de Concepción, Talcahuano, Penco y Hualpén, Región del Biobío*. Obtenido de Proyecto GEF: “Conservación de humedales costeros de la zona centro sur de Chile, hotspot de biosiversidad, a través del manejo adaptativo de los ecosistemas de borde costero” MMA/GEF/PNUMA 2019-2024”:<https://gefhumedales.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/07/Humedal-Rocuant-Andali%C3%A9n-.pdf>
- Navarro, V. (2017). *Oportunidades y desafíos para la protección de los humedales Rocuant-Andalién y Los Batros en el Área Metropolitana de Concepción: Una mirada desde la gobernanza urbana*. Obtenido de Repositorio Universidad de Chile: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/152380/oportunidades-y-desafios-para-la-proteccion.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ramsar. (2018). *Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and their Services to People 2018*. Obtenido de https://moef.gov.in/uploads/2019/12/gwo_e.pdf
- Rojas, C., Munizaga, J., Rojas, O., Martínez, C., & Pino, J. (2019). *Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city*. Obtenido de Land Use Policy Volume 80: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837717316289?via%3Dihub>
- Romero et al, H. (2001). *Ecología urbana y gestión ambiental sustentable de las ciudades intermedias chilenas*. Obtenido de Ambiente y Desarrollo. Vol XVII - N°4, pp. 45 - 51: https://www.researchgate.net/profile/Alexis-Vasquez-4/publication/40883154_Ecologia_urbana_de_las_ciudades_intermedias_chilenas/links/oa85e533596d03cf5b000000/Ecologia-urbana-de-las-ciudades-intermedias-chilenas.pdf
- Sekovski, I., Newton, A., & William, D. (2011). *Megacities in the coastal zone: Using a driver-pressure-state-impact-response framework to address complex environmental problems*. Obtenido de https://www.academia.edu/2874109/Megacities_in_the_coastal_zone_Using_a_driver_pressure_state_impact_response_framework_to_address_complex_environmental_problems

- Sepulveda, E., & Torres, J. (2021). *Valores Culturales y Conservación de Humedales: Fundamentos para un Biocentrismo Moderado*. Obtenido de Filosofía e historia de la ciencia y sociedad en Latinoamérica Vol. 1: Medio ambiente y sociedad / Política científica. Asociación de Filosofía e Historia de la Ciencia del Cono Sur (AFHIC).: https://www.researchgate.net/publication/352258239_Valores_culturales_y_conservacion_de_humedales_fundamentos_para_un_biocentrismo_moderado
- Smith, P., & Romero, H. (2009). *Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lengua*. Obtenido de Revista de Geografía Norte Grande, 43: 81-93: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-34022009000200005&script=sci_arttext
- USEPA. (2002). *Methods for evaluating wetland condition: Developing metrics and indexes of biological integrity*. Obtenido de U.S. Environmental Protection Agency: https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/wetlands_6metrics.pdf
- Zedler, J., & Suzanne, K. (2004). *Causes and consequences of invasive plants in wetlands: Opportunities, opportunists, and outcomes. Critical Reviews in Plant Sciences*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/228844921_Causes_and_Consequences_of_Invasive_Plants_in_Wetlands_Opportunities_Opportunists_and_Outcomes