



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
ESCUELA DE POSGRADO

**Integridad ecológica de humedales de la cuenca baja del río Tempisque, caso Humedal
Protegido Internacional Palo Verde, Costa Rica**

por

Luis Alfredo Guizada Duran

Tesis de Grado

**sometida a consideración de la Escuela de Posgrado como requisito para optar por el
grado de**

Magister Scientiae en Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad

Turrialba, Costa Rica, 2018

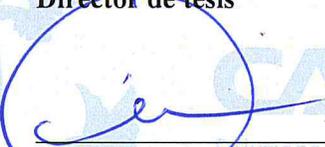
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y CONSERVACIÓN
DE BOSQUES Y BIODIVERSIDAD**

FIRMANTES:



Christian Herrera, M.Sc.
Director de tesis



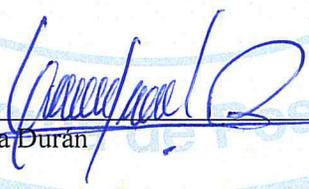
Diego Delgado, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mario Chacón, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.
Decana Escuela de Posgrado



Luis Alfredo Guizada Durán
Candidato

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han contribuido en el proceso y la culminación de este trabajo. En primer lugar, agradezco a CATIE por el apoyo institucional, la formación y el apoyo financiero para que esto haya llegado a su culminación. A todo mi comité de tesis: Christian Herrera, Diego Delgado, Mario Chacón y Lenin Corrales por su tiempo, sus aportes. Este es un trabajo que siempre fue llevado en equipo.

Agradezco a todas las personas involucradas durante el proceso entre experimentados, técnicos y científicos que contribuyeron de manera enriquecedora al trabajo. Gracias a NatureServe, OET, SINAC y CATIE.

Agradezco a funcionarios del Parque Nacional Palo Verde por toda la colaboración durante el recorrido por los humedales: Ulises Chavarría García, Isaac López Ardiles, Jimena Díaz y a Juan Marcial de la OET.

Tomar la oportunidad de ingresar a esta maestría fue gracias a mi papá y mi mamá. Tu Marian fuiste la razón por la que quise subir más un escalón, aunque el tiempo no fue un reflejo de este, te agradezco por existir.

Agradezco especialmente a mi hermano Mauri porque fuiste “Él” responsable de que esto haya sido real, sin tí nada sería como es. Gracias Fer por ser tan buena y mejorar este tiempo, por ser mi hermanita.

Durante estos casi 18 meses agradezco a todos los amigos que ingresaron y compartieron un tramo de mi camino en este plano. A los fabis, a los Panafieras y a todos los de la generación. De alguna forma y pese a todo, acabamos.

Agradecimientos especiales a Carolina, Yussef y Betanzos por todo, pero todo el apoyo. Fueron muy importantes en mi vida-CATIE, amigos para la vida.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
I. INTRODUCCIÓN	1
1. LOS HUMEDALES: EL ESTADO ACTUAL A NIVEL GLOBAL	1
2. ANTECEDENTES.....	1
3. JUSTIFICACIÓN	2
II. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
III. MARCO REFERENCIAL.....	3
1. DEFINICIÓN DE HUMEDALES Y SU CLASIFICACIÓN	3
2. ECOLOGÍA DE LOS HUMEDALES	5
<i>Suelos hídricos</i>	5
<i>Efectos de la inundación e hidrología</i>	5
<i>Biodiversidad</i>	6
<i>Fertilidad</i>	6
3. LA INTEGRIDAD ECOLÓGICA COMO ENFOQUE PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS ECOSISTEMAS Y SU PERMANENCIA EN EL TIEMPO.....	8
IV. METODOLOGÍA	10
1. ÁREA DE ESTUDIO	10
<i>Clima</i>	11
2. MÉTODOS.....	13
<i>Definición del Modelo Ecológico Conceptual (Ob.1)</i>	14
<i>Definición de los componentes centrales para la evaluación de la integridad ecológica (Ob. 2)</i>	14
<i>Elementos focales de manejo (EFM)</i>	14
<i>Atributos ecológicos clave (AEC)</i>	15
<i>Selección de indicadores (Ob.2-3)</i>	15
<i>Clasificación de indicadores (Ob.2-3)</i>	15
<i>Validación del MEC, EFM e indicadores (Ob. 3)</i>	16
<i>Establecimiento de la línea base (Ob. 4)</i>	16
<i>Determinación de rangos de variación aceptable de indicadores de primer nivel</i>	16
<i>Calificación del estado de conservación de EFM y AEC</i>	17

V. RESULTADOS	18
5.1 <i>Modelo ecológico conceptual para los humedales del sector PNPV</i>	<i>18</i>
5.2 <i>Componentes centrales para la evaluación de integridad ecológica.....</i>	<i>22</i>
5.2.1 <i>Elementos focales de manejo (EFM).....</i>	<i>22</i>
5.2.2 <i>AEC, indicadores y métricas para la evaluación de integridad ecológica</i>	<i>23</i>
5.2.3 <i>Descripción de los indicadores.....</i>	<i>24</i>
5.3 <i>Establecimiento de la línea base con los indicadores de medición actual.....</i>	<i>27</i>
5.3.1 <i>Rangos de variación aceptable determinados</i>	<i>27</i>
5.3.2 <i>Calificación de estado de los AEC y EFM de los humedales del sector PNPV</i>	<i>33</i>
VI. CONCLUSIONES	34
VII. RECOMENDACIONES Y PASOS A SEGUIR	35
VIII. BIBLIOGRAFÍA	36
IX. ANEXOS.....	42
<i>Anexo 1. Lista de los expertos, instituciones y personas consideradas para la creación, modificación, aceptación del proceso completo de EIE.....</i>	<i>42</i>
<i>Anexo 2. Protocolos por indicador.....</i>	<i>43</i>
<i>Indicadores de primer nivel. Medición actual.....</i>	<i>43</i>
<i>Indicadores de segundo nivel. Implementación inmediata y necesaria</i>	<i>55</i>
<i>Indicadores de tercer nivel. Potenciales para implementación</i>	<i>73</i>
<i>Anexo 3. Rutina en R y resultados del análisis de ARIMA para datos de estaciones meteorológicas.....</i>	<i>85</i>

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Preguntas de investigación	3
Cuadro 2. Tipos de humedales reconocidos para zonas tropicales y subtropicales	4
Cuadro 3. Calificación de cada indicador del estado de conservación de los elementos focales de manejo y los atributos ecológicos clave y el valor a asignar, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.....	17
Cuadro 4. Indicadores priorizados para la evaluación de integridad ecológica según su nivel de implementación en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	23
Cuadro 5. Lista de indicadores y su justificación dentro de la propuesta de EIE, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.....	24
Cuadro 6 Listado de AEC, indicadores y métricas sugeridas a tres niveles de implementación para cada EFM aplicados para los humedales del Parque Nacional Palo Verde	25
Cuadro 7. Rangos de variación aceptable para el indicador de composición y riqueza de aves acuáticas en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	28
Cuadro 8. Porcentaje de ocupación de tifa con respecto a la extensión total del humedal, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	30
Cuadro 9. Rangos de variación aceptable para el indicador de superficie de la vegetación invasora en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	30
Cuadro 10. Serie ajustada a un modelo ARIMA identificando los parámetros autorregresivos y de media móvil generados automáticamente según datos climáticos de estaciones meteorológicas del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	31
Cuadro 11. Rangos de variación aceptable en base al análisis histórico de 10 años obtenidos con respecto a una media móvil a 1,96 y 3 desviaciones estándar.	32
Cuadro 12. Rangos de variación permisible para el indicador de estrés hídrico en humedales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	32
Cuadro 13. Rangos de variación permisible para el indicador de estrés térmico con dos variantes en humedales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	33
Cuadro 14. Calificación del estado de cada indicador por EFM en humedales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Marco conceptual de un sistema de humedal típico (modificado de Mutch et al. (2008)).....	8
Figura 2. Área de estudio en el Humedal Protegido Internacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	11
Figura 3. A. Precipitación promedio anual; B. Variación de la temperatura media anual con valores de temperatura media, máxima y mínima; C. Variación de la humedad relativa promedio anual en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	12
Figura 4. Marco metodológico de la evaluación de integridad ecológica para los humedales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	13
Figura 5. Modelo ecológico conceptual para el HPPII-PV sector Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica. El modelo se fundamenta en conductores (resaltados a color) que generan diferentes estreses en el sistema (simbolizados por líneas y puntos), los cuales tienen un efecto en diferentes procesos ecológicos de manera conjunta o individual (símbolos). Estos procesos pueden ser monitoreados y controlados identificando atributos relevantes medido a través de indicadores.	19
Figura 6. Riqueza de especies de aves en tres sitios del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica. La línea de corte en el eje de las abscisas es el máximo número histórico registrado.	28
Figura 7. Gráficos de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (Parcial ACF) con la serie de tiempo y los residuos del modelo ARIMA con datos de temperatura, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.....	85
Figura 8. Gráficos de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (Parcial ACF) con la serie de tiempo y los residuos del modelo ARIMA con datos de humedad relativa, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	86
Figura 9. Gráficos de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (Parcial ACF) con la serie de tiempo y los residuos del modelo ARIMA con datos de precipitación anual, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	86
Figura 10. Gráficos de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (Parcial ACF) con la serie de tiempo y los residuos del modelo ARIMA con datos diferenciados de radiación solar, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica	87

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACT: Área de Conservación Tempisque, Costa Rica

ACAT: Área de Conservación Arenal–Tempisque, Costa Rica

ACRXS: Asociación Costa Rica Por Siempre

AEC: Atributo ecológico clave

ARIMA: Autorregresivo Integrado de Media Móvil

ASP: Área silvestres protegida

CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés

EFM: Elemento focal de manejo

EIE: Evaluación de integridad ecológica

HPII-PV: Humedal Protegido de Importancia Internacional Palo Verde, Costa Rica

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, por sus siglas en inglés

MEC: Modelo ecológico conceptual

MRA: Misión Ramsar de Asesoramiento

Minae: Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica

OET: Organización de Estudios Tropicales, Costa Rica

PNPV: Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica

Sinac: Sistema Nacional de Áreas de Conservación, Costa Rica

TNC: The Nature Conservancy

RESUMEN

La investigación se centró en establecer una primera propuesta de evaluación de integridad ecológica (EIE), en los humedales de la cuenca baja del río Tempisque, utilizando como estudio de caso a los humedales del sector del Parque Nacional Palo Verde (PNPV) que forman parte del Humedal Protegido de Importancia Internacional Palo Verde (HPPII-PV). El HPPII-PV es uno de los sitios Ramsar más importantes del pacífico mesoamericano y es uno de los siete humedales priorizados para la conservación de los humedales por las autoridades del Ministerio Nacional de Ambiente y Energía (Minae) en Costa Rica. Hace aproximadamente diez años, se realizaron una serie de medidas de manejo, siendo el fangueo una de las más significativas en el sector del PNPV con el objetivo de restaurar las condiciones ecológicas y recuperar su integridad, evaluando la efectividad de estas actividades a través de la EIE para la cual aún una propuesta no ha sido estandarizada. Mediante la revisión bibliográfica, consulta a expertos, talleres y entrevistas a técnicos del PNPV, se identificaron y definieron los componentes centrales para la EIE de los humedales y para la formulación del modelo ecológico conceptual (MEC). Con la creación de este modelo de los humedales del sector PNPV se establecieron las bases de la propuesta de EIE, que fundamentan la orientación de cada componente central de dicha evaluación. Fueron identificados tres elementos focales de manejo (EFM): los ecosistemas palustres, los ecosistemas ribeños de la cuenca baja del río Tempisque y los ecosistemas estuarinos. Para cada uno de estos EFM se obtuvieron siete atributos ecológicos clave (AEC) que se propone sean monitoreados a través de trece indicadores que miden la condición, el tamaño y/o el contexto paisajístico de los humedales. Debido a la disponibilidad de información, se propuso una diferenciación de aplicación de estos indicadores en tres niveles de implementación: (1) medición actual, (2) de implementación inmediata y (3) potencial para implementación. Con los indicadores de primer nivel, se realizó los análisis para el establecimiento de rangos de variación aceptable (con base en variaciones históricas y referencias bibliográficas) y se evaluó la integridad ecológica de los humedales del sector PNPV. A partir de un trabajo recopilatorio y de análisis, el PNPV cuenta con una herramienta que permitirá al país monitorear ecosistemas de humedales de la cuenca baja del río Tempisque desde un enfoque de integridad ecológica y que conceptualmente da las directrices para realizar evaluaciones similares en otros ecosistemas de humedales en Costa Rica.

PALABRAS CLAVE: Humedal protegido de importancia internacional, integridad ecológica, modelo ecológico conceptual, rangos de variación aceptable, indicadores.

ABSTRACT

The research focused on establishing a first proposal for the Ecological Integrity Assessment (EIA) in the wetlands of the lower basin of the Tempisque River, using as a case study the wetlands of the Palo Verde National Park (PNPV) sector that are part of the Protected Wetland of International Importance Palo Verde (HPII-PV). The HPII-PV is one of the most important Ramsar sites of the Mesoamerican Pacific and is one of the seven wetlands prioritized for the conservation of wetlands in Costa Rica by the authorities of the National Ministry of Environment and Energy (MINAE) in Costa Rica. Approximately ten years ago, a series of management measures were carried out, with puddling being one of the most significant, in the sector of the National Park of the same name with the aim of restoring ecological conditions and recovering their integrity, evaluating the effectiveness of these activities through EIA for which even a proposal has not been standardized. Through bibliographic review, consultation with experts, workshops and interviews with PNPV technicians, the central components for the EIE of wetlands and for the formulation of the conceptual ecological model (MEC) were identified and defined. With the creation of the MEC of the wetlands of the PNPV sector it was established the basis of the EIA proposal, which that support the orientation of each central component of the EIE. Three Focal Management Elements (FEM) were identified: the marsh ecosystems, the ribesian ecosystems of the lower basin of the Tempisque River and the estuarine ecosystems. For each of these FEM, seven Key Ecological Attributes (KEA) were obtained, which are proposed to be monitored through thirteen indicators that measure the condition, size and / or landscape context of the wetlands. Due to the availability of information, a differentiation of application of these indicators was proposed at three levels of implementation: (1) current measurement, (2) immediate implementation and (3) potential for implementation. With the first level indicators, the analyzes for the establishment of Acceptable Variation Ranges (based on historical variations and bibliographical references) were carried out and the Ecological Integrity of the wetlands of the PNPV sector was evaluated. Based on a compilation and analysis work, the PNPV has a tool that will allow the country to monitor the wetland ecosystems of the lower Tempisque river basin from an Ecological Integrity approach and that conceptually gives the guidelines for carrying out similar assessments in other ecosystems of wetlands in Costa Rica.

Key Words: Protected wetland of international importance, ecological integrity, conceptual ecological model, acceptable ranges of variation, indicators.

I. INTRODUCCIÓN

1. Los humedales: el estado actual a nivel global

La red de humedales de la Convención sobre los Humedales (Convención Ramsar) comprende 2231 humedales de importancia internacional (HPII) a nivel mundial que cubren 215 051 273 ha del territorio global (Ramsar 2017). La pérdida y degradación de los humedales es una realidad y son atribuidos a la humanidad directamente debido al aumento poblacional y el crecimiento económico. Si bien algunos reportes cuantifican una pérdida del 50% de los humedales en el mundo desde la década de 1950 (EEM 2005), estas estimaciones son discutidas por otros autores dando valores por sobre o por debajo de ese estimado (Davidson 2014; Hu *et al.* 2017a). A pesar de generarse una controversia sobre la extensión exacta de humedales perdidos, los generadores directos no son discutidos e incluyen el desarrollo de la infraestructura, la conversión de tierras, extracción de agua, la contaminación, la recolección excesiva y la sobreexplotación y la introducción de especies exóticas invasoras (EEM 2005; Zedler y Kercher 2005; Ramsar 2016; Hu *et al.* 2017a).

El cambio climático juega, al mismo tiempo, un papel muy influyente en la dinámica de los humedales dado que las condiciones hidrológicas los definen y cualquier alteración en el volumen de agua, o deterioro en la calidad del agua y los incrementos en la carga de nutrientes (eutrofización), amenazan la integridad y el futuro de los mismos (EEM 2005; Zedler y Kercher 2005; Mitsch y Gosselink 2015). Conocer la condición en la que estos ecosistemas se encuentran, manteniendo los procesos ecológicos y dando los servicios ambientales que deberían dar en condiciones no perturbadas, es un desafío para los actuales sistemas de monitoreo.

Los humedales representan uno de los ecosistemas más importantes en el mundo y uno de los más amenazados. Juegan un rol importante en el cambio climático suministrando a la atmósfera una evapotranspiración potencial o casi potencial, absorben CO₂ y emiten metano (Russi *et al.* 2013). En el aspecto de la biodiversidad, los humedales de agua dulce albergan más del 40% de las especies del mundo, a pesar de ocupar solo el 1% de la superficie de la tierra (Mittra *et al.* 2003). Hidrológicamente, reponen las aguas subterráneas, regulan el movimiento del agua y la purifican (Mitsch y Gosselink 2015). Asimismo, benefician a la sociedad porque recargan los acuíferos, retienen los sedimentos y nutrientes, controlan las inundaciones y proporcionan protección contra las tormentas y estabilizan del microclima (Mitsch y Gosselink 2015; Hu *et al.* 2017b).

2. Antecedentes

Costa Rica cuenta con más de 350 humedales que corresponden a un siete por ciento del territorio Nacional (MINAE 2016). Entre estos, cerca del 30% se encuentra protegido y 12 de ellos han sido declarados de importancia internacional por la Convención Ramsar con base a su importancia para la conservación de la biodiversidad y/o su singularidad en el tipo de humedal (MINAE 2016; SINAC 2016b). Uno de los HPII más importantes para el país es el de Palo Verde (HPII-PV) que protege los últimos remanentes de bosque seco tropical de la zona. Representa el 15% de la superficie total de los humedales de Costa Rica y es uno de los sistemas lénticos estacionales más importantes del pacífico mesoamericano (SINAC 2013). Gracias a sus características ecológicas, la Convención Ramsar reconoce su valor ecológico en 1991 y nombra

sitio Ramsar HP2-PV a los humedales, dentro y adyacentes al Parque Nacional Palo Verde (PNPV) (Ramsar 1998; SINAC 2012).

El HP2-PV ha sufrido cambios con respecto a su condición histórica, principalmente debido a actividades humanas y modificaciones en el paisaje. Durante mediados de los años setenta, los cuerpos de agua eran los hábitats dominantes, años después con cambios en la dinámica de los incendios, el paisaje se volvió más heterogéneo con pastos y vegetación flotante. Más tarde, cambios en la hidrología por pérdidas de caudales, eliminación de pastoreo, intervenciones antrópicas como la desviación de aguas de escorrentía para la construcción de caminos y variaciones climáticas extremas (periodos de sequía extensos), cambiaron de manera radical el paisaje propiciando la colonización de especies invasoras como la tifa (*Typha dominguensis*) que sustituyeron coberturas naturales como cuerpos de agua. Esto llevó a una degradación acelerada del ambiente alterando patrones hidrológicos y facilitando el crecimiento de otras especies invasoras como palo verde (*Parkinsonia aculeata*) (Jimenez 2016). A consecuencia de estos cambios en 1993, el HP2-PV entra al registro Montreux que agrupa a los humedales con urgencia de atención para su conservación, por la cual se reconoce la necesidad de acciones de manejo activo para la rehabilitación de los humedales (Decreto Ejecutivo N°27345-MINAE) a consecuencia de una Misión Ramsar de Asesoramiento (MRA) realizada en el 2011 (Ramsar 2012).

Durante cerca de una década se ha realizado una serie de medidas de manejo dentro de los humedales en el sector del PNPV, las cuales son sistematizadas en el documento de Bonilla (2016). Estas medidas van desde prácticas de control de especies invasoras por fangueo, quemas controladas, corta de vegetación y remoción directa (SINAC 2012), hasta monitoreos del espejo de los cuerpos de agua que han permitido realizar estudios de monitoreo biológico para evaluar el impacto de las acciones de manejo que han sido implementados (Trama *et al.* 2009).

3. Justificación

Actualmente, el Cuarto Plan Estratégico Ramsar 2016-2024 (Ramsar 2016), contempla al monitoreo de integridad ecológica como componente importante para el seguimiento del éxito dentro de dos de sus principales líneas estratégicas: (1) hacer frente a los factores que impulsan la pérdida y degradación de los humedales y (2) llevar a cabo la conservación y un manejo eficaz de la red de humedales. Así mismo, la Política Nacional de Humedales de Costa Rica, en su eje de “conservación de los ecosistemas de humedal, sus bienes y sus servicios”, se fija la meta de establecer un sistema de indicadores, así como planes de monitoreo y protocolos de recopilación de datos que valoren la integridad ecológica de los ecosistemas de humedal, considerando al menos indicadores de extensión, contexto paisajístico, composición y estructura (MINAE 2016; Ramsar 2016).

Con el resultado de la última MRA realizada en el 2011 en el HP2-PV (Ramsar 2012), y siguiendo las recomendaciones propuestas en su respectivo informe, se establece dentro del Plan Específico de Manejo de Recursos Naturales del PNPV (SINAC 2016b) y el Plan de Intervención y Monitoreo PNPV (SINAC In Rev.) monitorear el estado de conservación del sistema a través de las metodologías de integridad ecológica para medir el grado de recuperación y rehabilitación de las condiciones ecológicas en el sitio.

II. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Objetivo general

Establecer una propuesta para la evaluación de la integridad ecológica de humedales palustres, riberinos y estuarinos aplicado al sector del PNPV en Costa Rica.

Objetivos específicos

- Definir el modelo ecológico conceptual (MEC) para los humedales del sector PNPV.
- Identificar los elementos focales de manejo (EFM), los atributos ecológicos clave (AEC), los indicadores y los rangos de variación aceptable para los humedales del sector PNPV.
- Validar de manera consensuada la aplicabilidad de los indicadores potenciales para el monitoreo de la integridad ecológica en los humedales del sector PNPV.
- Establecer una línea base de referencia para el monitoreo de la integridad ecológica en los humedales del sector PNPV.

Cuadro 1. Preguntas de investigación

Objetivos	Preguntas
Definir el MEC para los humedales del sector PNPV.	¿Cuáles son las fuentes (conductores) y los efectos de los principales estresores en el sistema natural de los humedales del sector PNPV?
Identificar los elementos focales de manejo (EFM), los atributos ecológicos clave (AEC), los indicadores y los rangos de variación aceptable para los humedales del sector PNPV.	¿Qué elementos son relevantes para una apropiada EIE aplicada para los humedales del sector PNPV?
Validar de manera consensuada la aplicabilidad de los indicadores para el monitoreo de la integridad ecológica en los humedales del sector PNPV.	Los indicadores propuestos ¿son factibles de medir según las características de los humedales del sector PNPV y según las capacidades y limitaciones técnicas-humanas con que cuenta el Parque?
Establecer una línea base de referencia para el monitoreo de la integridad ecológica en los humedales del sector PNPV.	¿Cuál es el estado de la integridad ecológica de los EFM, AEC e indicadores de medición actual en los humedales del sector PNPV?

III. MARCO REFERENCIAL

1. Definición de humedales y su clasificación

Los humedales se definen como “*las 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 agua marina cuya profundidad en marea baja no excede los seis metros*” (Ramsar 2007). En

general se reconocen cinco tipos de humedales según los sistemas ecológicos: marinos, estuarinos, riberinos, lacustres y palustres (Cowardin *et al.* 1979; Ramsar 2007; MINAE 2016), detallados en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Tipos de humedales reconocidos para zonas tropicales y subtropicales

Clasificación	Descripción
Sistema marino	Corresponde a las áreas litorales expuestas a flujos de aguas oceánicas. Incluyen las áreas de inundación de las mareas más altas hasta el área límite posterior de fanerógamas marinas o arrecifes de coral, hasta seis metros de profundidad en marea baja. Lechos marinos submareales: praderas de algas, de pastos marinos y praderas marinas mixtas tropicales; costas marinas rocosas: incluye islotes rocosos y acantilados; aguas marinas someras permanentes: bahías y estrechos; playas de arena o de guijarros: bancos, cordones, puntas e islotes de arena; arrecifes de coral.
Sistema estuarino	Corresponde a hábitats de aguas profundas y tierras adyacentes con influencia de mareas donde aguas oceánicas y dulces se diluyen. Estuarios: humedales intermareales arbolados: manglares, pantanos de “nipa”, bosques inundados o inundables mareales; pantanos y esteros (zonas inundadas) intermareales: marismas, zonas inundadas con agua salada, praderas halófilas, salitrales, zonas elevadas inundadas con agua salada, zonas de agua dulce y salobre inundadas por la marea de agua dulce.
Sistema riberino	Incluyen los ambientes acuáticos periódicos, permanentes o temporales con un curso de agua en movimiento. Se excluyen sistemas con árboles, arbustos o vegetación emergente persistente. Hábitats acuáticos con depresiones topográficas o de drenaje represado natural o artificial; lagos o lagunas con más de dos metros de profundidad, carentes de árboles, arbustos emergentes permanentes y con vegetación emergente, flotante, musgos y/o líquenes.
Sistema lacustre	Lagos permanentes de agua dulce, incluye meandros o brazos muertos de río; lagos o lagunas estacionales/intermitentes de agua dulce, incluye lagos en llanuras de inundación; lagos o lagunas permanentes salinos/salobres/alcalinos; lagos y zonas inundadas estacionales/intermitentes salinos/salobres/alcalinos.
Sistema palustre	Incluyen todos los humedales de tipo no mareal, dominados por árboles, arbustos, emergentes persistentes, musgos emergentes o líquenes y todos esos humedales que ocurren en áreas de marea donde la salinidad derivada de las sales del océano es inferior a 0,5 ppt. También incluye los humedales con profundidad del agua en la parte más profunda de la cuenca de menos de 2 m en aguas bajas. Yolillales, bosques anegados de agua dulce; pantanos/esteros/charcas permanentes salinas/salobres/alcalinos; pantanos/esteros/charcas estacionales/intermitentes/permanentes; pantanos y esteros sobre suelos inorgánicos, con vegetación emergente en agua por lo menos durante la mayor parte del período de crecimiento; pantanos/esteros/charcas estacionales/intermitentes de agua dulce sobre suelos inorgánicos; turberas no arboladas; humedales boscosos de agua dulce.

Fuente: Cowardin *et al.* (1979), Ramsar (2007) y reconocidos actualmente en la Política Nacional de Humedales en Costa Rica (MINAE 2016)

2. Ecología de los humedales

Describir los procesos que ocurren en un humedal no es sencillo, debido a las propiedades únicas como las aguas estancadas o los suelos anegados, las condiciones anóxicas y las adaptaciones de plantas y animales que no son cubiertas de manera adecuada por los paradigmas ecológicos actuales como la limnología, ecología estuarina y/o ecología terrestre, por lo que un campo específico de la ecología es la ecología de humedales (Mitsch y Gosselink 2015).

A pesar de la variación en condiciones y procesos, dentro de los humedales se puede determinar un reducido número de factores comunes como (1) suelos hídricos muy distintos por los reducidos niveles de oxígeno, con gran cantidad de materia orgánica y microbiota especializada al sistema; (2) efectos de inundación en el tiempo y la profundidad que modifican la composición química del suelo del humedal; y (3) plantas y animales (principalmente insectos, peces, anfibios y reptiles) adaptados a condiciones de hipoxia (Keddy 2010a). Estos factores son ampliados más adelante.

Suelos hídricos

En los humedales, los procesos químicos y biológicos del suelo ocurren en condiciones de saturación, inundación o periodos largos de estancamiento del agua donde el oxígeno es removido debido a la presencia de agua, causando, en lugar de lixiviación, condiciones químicamente reducidas (Keddy 2010a; Mitsch y Gosselink 2015). Por tanto, la presencia de un tipo de suelo en particular es una característica definitoria de los humedales porque es el medio donde se realizan todas las transformaciones químicas de los humedales y el almacenamiento primario de sustancias disponibles para la mayoría de las plantas del humedal (Keddy 2010a; Mitsch y Gosselink 2015). Estos suelos se clasifican en dos tipos: suelos minerales y suelos orgánicos, diferenciados principalmente por el contenido de materia orgánica y las reacciones *redox* que ocurren en ellos. Los suelos de tipo mineral están relacionados a humedales de agua dulce y bosque ribereño y se caracterizan por tener una composición orgánica menor al 35%, un pH que bordea la neutralidad, una conductividad alta, una capacidad de retención de agua baja y una alta disponibilidad de nutrientes (Mitsch y Gosselink 2015). Los suelos orgánicos por su parte, son suelos saturados con agua por periodos largos de tiempo si almacenan entre 12 y 18% de carbono orgánico o si a pesar de no saturarse de agua por más de unos cuantos días contienen más del 20% de carbono orgánico (Mitsch y Gosselink 2015).

Efectos de la inundación e hidrología

Uno de los factores y quizás el más importante en el estudio de los humedales, es el agua. La composición biológica de un humedal depende de la forma de movimiento del agua dentro del mismo, es decir, de los procesos de entrada, movimiento y salida del agua a través del sistema (Solís 1991) que junto con los procesos de erosión y sedimentación, a largo plazo, controlan la forma, tamaño, profundidad y localización del humedal, además de la presencia y/o ausencia de especies (Solís 1991). Conocer los aspectos hídricos predominantes en el sistema como la fuente de agua (marinas, subterráneas, ríos, precipitaciones); la forma de salida del agua (evapotranspiración, escurrimiento superficial o descarga subterránea) y la profundidad y la velocidad del agua es fundamental en el estudio de la hidrología del sistema.

Al mismo tiempo, la amplitud, la frecuencia y los niveles de agua son probablemente los componentes más importantes que afectan la composición y función de los humedales. Las

fluctuaciones en el nivel de agua afectan a todas las especies de animales de una manera específica según el grupo taxonómico, afectando también el hábitat circundante asociado a los humedales (Keddy 2010b). Básicamente, el efecto de las inundaciones se resume en: (1) mientras más grande es la amplitud de la fluctuación, más extensa es el área del humedal y, (2) la abundancia relativa de los tipos de humedales en el paisaje dependerá de la frecuencia y duración de las inundaciones (Keddy 2010b).

El efecto de la inundación en los humedales repercute rápidamente en la química del suelo. Además de la pronta desaparición de oxígeno y nitratos, gases como el metano, ácido sulfhídrico y amonio comienzan a acumularse y los iones ferrosos comienzan a aparecer. Por lo tanto los organismos habitantes en estos ecosistemas están sujetos a tres problemas metabólicos: escases de oxígeno, concentraciones atípicas de iones y exposición a gases tóxicos (Keddy 2010a). Anidado a este efecto, los cambios o fluctuaciones constantes en los niveles de agua son esenciales para mantener la diversidad y abundancia de especies en los humedales; periodos de aguas bajas son importantes para algunas especies que persisten como semillas enterradas en sedimentos, o estaciones de aguas altas ahogan a la vegetación leñosa permitiendo la expansión del cuerpo de agua y la proliferación de otras especies de plantas emergentes. Por tanto, la estabilización de los cuerpos de agua reduce el área del humedal y baja la diversidad de especies por lo que mantener la hidrología natural es una parte esencial para el manejo y conservación de un humedal (Keddy 2010b).

Biodiversidad

La presencia de plantas hidrófitas es otro atributo determinante en los tipos de humedales ya que además se convierten en el hábitat fundamental para la fauna silvestre de un humedal. Estas plantas deben estar adaptadas a condiciones temporales o permanentes de inundación. Estas adaptaciones pueden ser agrupadas en tres principales categorías: estructurales o morfológicas, fisiológicas y estrategias de la planta (Mitsch y Gosselink 2015). Las primeras están ligadas principalmente al desarrollo de espacios aéreos que permiten la difusión de oxígeno hacia las raíces; las segundas regulan procesos metabólicos como la respiración y absorción de nutrientes; y la últimas son modificaciones en las estrategias reproductivas de las especies (más detalles de cada una pueden ser consultados en el libro de Mitsch y Gosselink (2015)).

Para la fauna, la hipoxia también es un estresor que puede ser sobrellevado con adaptaciones en la respiración (peces que respiran aire), o adaptaciones comportamentales (caminar, enterrarse o migraciones). De hecho, algunos anfibios pueden intercambiar gases con el ambiente y los reptiles modificar sus hábitos de respiración (Keddy 2010a).

Fertilidad

Otro de los factores influyentes en la composición y función de los humedales es la fertilidad. Esta se encarga de controlar la biomasa a través de la disponibilidad de nitrógeno y fósforo que limitan el crecimiento de las plantas. Si bien la fertilidad se correlaciona directamente con la biomasa, está inversamente correlacionada con la riqueza de especies. Áreas con mayor fertilidad, tienen la capacidad de alojar plantas más grandes, con rápido crecimiento, resultando en una mayor biomasa y por tanto más producción para brindar hábitats para la fauna (Keddy 2010c).

Con toda la vida asociada a los humedales, la provisión de elementos esenciales para el crecimiento y la reproducción de éstos es un factor primordial en los humedales. Generalmente, parece que los dos elementos más importantes son el nitrógeno y el fósforo; por tanto, su disponibilidad es una forma de evaluar cuan adecuado es el hábitat para las especies (Keddy 2010c). Experimentos en los Everglades mostraron como *Typha* responde rápidamente al uso de fertilizantes para incrementar su tasa de crecimiento e incluso mejora en aguas más profundas, por lo que mayores inundaciones y más nutrientes desencadena a una mayor proliferación de esta especie (Keddy 2010c).

Al mismo tiempo, si la fertilización incrementa los niveles de N y P en los tejidos de las plantas, el valor de estas se incrementa para los animales, llevando a un incremento en los procesos interespecíficos como la herbivoría. Ambientes carentes de nutrientes donde la lluvia se vuelve la principal fuente de agua para el humedal, se vuelven sensibles a cualquier incremento en la disponibilidad de nutrientes (Keddy 2010c). Las actividades humanas muchas veces contribuyen al incremento de los nutrientes en el agua de lluvia y la escorrentía como consecuencia de la erosión del suelo y la fertilización para sistemas agrícolas (Keddy 2010c). Siendo los humedales lugares donde los nutrientes tienden a acumularse, se esperarían varias consecuencias como: incremento en la herbivoría por convertir a algunas plantas más palatables; en cuerpos con aguas poco profundas, incrementan las poblaciones de algas flotantes que pueden matar a especies macrofitas; con la muerte de algas y macrofitas, el consumo de oxígeno provoca condiciones de hipoxia que mata a los peces (Keddy 2010c). Por tanto, juntos la fertilidad con la hidrología explican mucho sobre la composición, función y distribución de los humedales.

Otros factores

Anexados a los factores mencionados arriba, la salinidad, y los factores que se relacionan con el paisaje adyacente a un humedal (usos circundantes, densidad y población humana), son también útiles para considerarlos al momento de definir las condiciones ecológicas de un humedal. Por un lado, la salinidad es perjudicial para muchas especies que incluso normalmente utilizan los humedales y muchas veces puede lograr cambiar el complejo de especies que forman un hábitat en el humedal. El efecto negativo de la salinidad se da en la depresión del crecimiento de las plantas e incluso repercute en el éxito germinativo de algunas especies. Además provoca una pérdida de la diversidad taxonómica de plantas y macroinvertebrados en un humedal (Keddy 2010d). Por otro lado, los diferentes efectos indirectos como la presencia de caminos, distancia a bosques, tipo de corriente y diferentes actividades humanas también deben ser consideradas para tener un análisis espacial más detallado de como diferentes factores repercuten sobre los humedales.

Con los diferentes factores analizados previamente, y con base en los manuales actualizados de la Convención Ramsar (Ramsar 2010), las características ecológicas de un humedal se definen como el resultado de la combinación de los componentes bióticos y abióticos y los procesos y servicios del ecosistema en un determinado momento. Dentro de un humedal se establecen los componentes, procesos y servicios que ligados a estresores ambientales y antrópicos pueden ser alterados. Mutch *et al.* (2008) nos muestran a través de la Figura 1, como podemos conceptualizar el funcionamiento de un humedal tipo, considerando los componentes identificados y reconocidos por la Convención Ramsar.

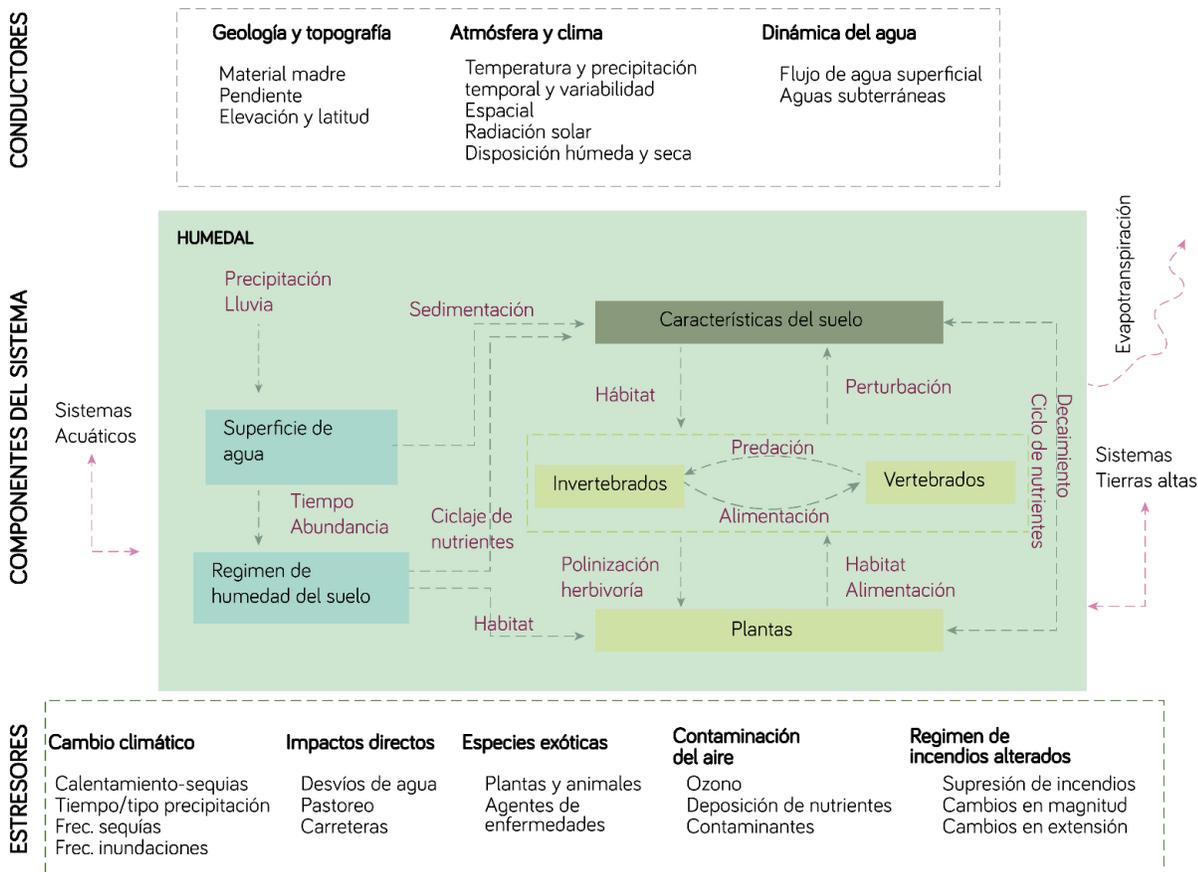


Figura 1. Marco conceptual de un sistema de humedal típico (modificado de *Mutch et al. (2008)*)

3. La integridad ecológica como enfoque para la evaluación del estado de los ecosistemas y su permanencia en el tiempo

La integridad ecológica es definida por Parrish *et al.* (2003) como “la capacidad de un sistema ecológico de mantener una comunidad biológica o un paisaje donde la estructura de sus especies, la composición y las funciones en procesos ecológicos sean equiparables a los hábitats naturales dentro de una región específica”. Los mismos autores señalan que un sistema ecológico es viable o íntegro cuando las características dominantes como estructura, composición, función y procesos ocurren dentro de un rango de variación natural y son capaces de resistir y recuperarse a perturbaciones naturales o antrópicas. Entendiéndose a *Estructura* como la organización o patrones de un sistema; *Composición* a la identificación y variedad de elementos; y *Función* al rol que cumplen las especies y/o procesos que ocurren dentro del ecosistema que envuelven procesos ecológicos y evolutivos (Noss 1990; Moreno 2001).

Debido a que el foco tradicional de conservación de cualquier sitio es la diversidad biológica como tal, el seguimiento o monitoreo a través de censos o mediciones de índices de integridad ecológica parecen ser una vía potencial para la medición del éxito. Por ello se desarrolla un marco conceptual que utiliza puntuaciones ecológicas fáciles de interpretar por manejadores y tomadores de decisiones no especializados (Tierney *et al.* 2009).

El marco conceptual en el que se fundamenta la evaluación de integridad ecológica (EIE) es adoptado de la Guía Metodológica para la Integridad Ecológica en Áreas Silvestres

Protegidas de Costa Rica (SINAC 2016a), que mantiene los conceptos propuestos por The Nature Conservancy (2003), Parrish *et al.* (2003) y Herrera y Corrales (2004) y que reúne los procedimientos recomendados para la evaluación de indicadores de integridad ecológica para Costa Rica. Este marco conceptual, denominado “Medidas de éxito” por The Nature Conservancy (2003), determina la integridad ecológica de un sistema con base en cuatro componentes centrales: (1) Seleccionar una serie limitada de objetos de conservación, denominados de forma oficial en el país como elementos focales de manejo (EFM), (2) Identificar los atributos ecológicos clave (AEC) para cada objeto junto con sus indicadores, (3) Identificar un rango aceptable de variación dentro del cual el atributo se encuentre para que un objeto sea considerado conservado y (4) Evaluar y calificar el estado de la calidad de cada objeto de conservación bajo un sistema “semáforo”, según el grado de intervención necesaria para mantenerlo dentro de sus niveles de variación aceptable.

Como punto de inicio para el proceso de la EIE es necesario sintetizar y ordenar el conocimiento del ecosistema. Este tipo de trabajo se basa en hipótesis que explican las fuentes y los efectos de los cambios en el sistema natural (Ogden *et al.* 2005). Estas hipótesis identifican estresores específicos de gran escala y describe el vínculo entre los efectos ecológicos de los mismos y los atributos biológicos recomendados que pueden servir como mejores indicadores al momento de realizar la EIE. A este proceso, que sintetiza y organiza el conocimiento existente del ecosistema, se le denomina modelo ecológico conceptual (MEC), con el cual podemos identificar con mayor facilidad cada componente central de la EIE.

Un EFM se define como aquellas especies, comunidades o ecosistemas enteros que representan la biodiversidad o paisajes de interés para ser conservado. Estos EFM son elegidos porque su integridad o dinámica poblacional varía en respuesta al rango de los factores ambientales y procesos ecológicos donde se encuentran e influyen al resto de componentes del sistema que funcionan como sombrillas (Parrish *et al.* 2003; Herrera y Corrales 2004). Para cada EFM se identifican un número limitado de características biológicas, procesos ecológicos e interacciones con el medio ambiente que distinguen a los objetos de conservación entre ellos y se define la variación natural en el tiempo (Parrish *et al.* 2003; Herrera y Corrales 2004).

Algunas de estas características son clave porque determinan la composición, estructura, interacciones y funciones del sistema y hace posible que los EFM persistan, y son denominados atributos ecológicos clave (AEC) (Herrera y Corrales 2004; SINAC 2016a). Cada uno de los atributos incluyen tres factores importantes (contexto paisajístico, tamaño y condición). El contexto paisajístico estará referido a la estructura espacial y los procesos críticos ambientales que operan a nivel de paisaje; el tamaño se refiere a atributos relacionados con el tamaño del sistema medido en extensiones de área o tamaño poblacional y la condición está referida a la estructura biótica, abiótica y procesos que ocurren en el sistema (Faber-Langendoen *et al.* 2012a).

La EIE se basa en el precepto de que cualquier disturbio significativo en las funciones de alguno de estos atributos podría degradar la integridad de los objetos de conservación (The Nature Conservancy 2003). Es así como un EFM se mantiene o persiste en el tiempo de manera viable si mantiene su tamaño, su condición y su contexto en el paisaje que con frecuencia son difíciles de cuantificar de manera directa. Es por ello que la identificación de los AEC también requiere de la identificación de indicadores que midan los cambios en el estado de los atributos. Estos indicadores deben ser biológicamente relevantes, sensibles a estrés antropogénico pero

con rangos de variación natural, cuantificables y efectivos a bajo costo; que trabajen bajo umbrales ecológicos para calificar el estado de los atributos (Herrera y Corrales 2004).

La base fundamental para la EIE ecológica descansa en la premisa de que la composición, estructura y función del ecosistema varían naturalmente dentro de rangos reconocidos y aceptados a lo largo del espacio y el tiempo. Así, todos los AEC medidos por sus respectivos indicadores que se encuentren dentro de esta variación “natural” serán considerados “conservados” (Parrish *et al.* 2003; Herrera y Corrales 2004; Tierney *et al.* 2009; SINAC 2016a).

Sin embargo, responder a la pregunta ¿qué es “natural”? es difícil. El conocimiento acerca de las poblaciones, comunidades y más aún ecosistemas, es muy inicial aún. Por ello, los rangos de variación natural son simplemente hipótesis de un estado deseable de cada atributo basados en modelos ecológicos, conocimiento de expertos y/o comparaciones con otros ejemplos, por lo que el término se transforma en los límites aceptables o permisibles de variación que permiten categorizar los atributos en un sistema “semáforo” para la toma de decisiones (Parrish *et al.* 2003).

IV. METODOLOGÍA

1. Área de estudio

Este trabajo se realizó en el sector del PNPV dentro del HPPII-PV que está localizado en el área de inundación del río Tempisque al noroeste de Costa Rica, dentro la provincia de Guanacaste (10°20'45" Norte – 85°20' 62" Oeste). El HPPII-PV se encuentra dentro del Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT) y Área de Conservación Tempisque (ACT) y es conformado por el Parque Nacional Palo Verde (PNPV), el Refugio Nacional de Vida Silvestre Mata Redonda y el Humedal Nacional Corral de Piedra. El área de estudio está limitada al sector PNPV y los humedales que están presentes dentro del mismo, (Figura 2) pertenecientes al ACAT.

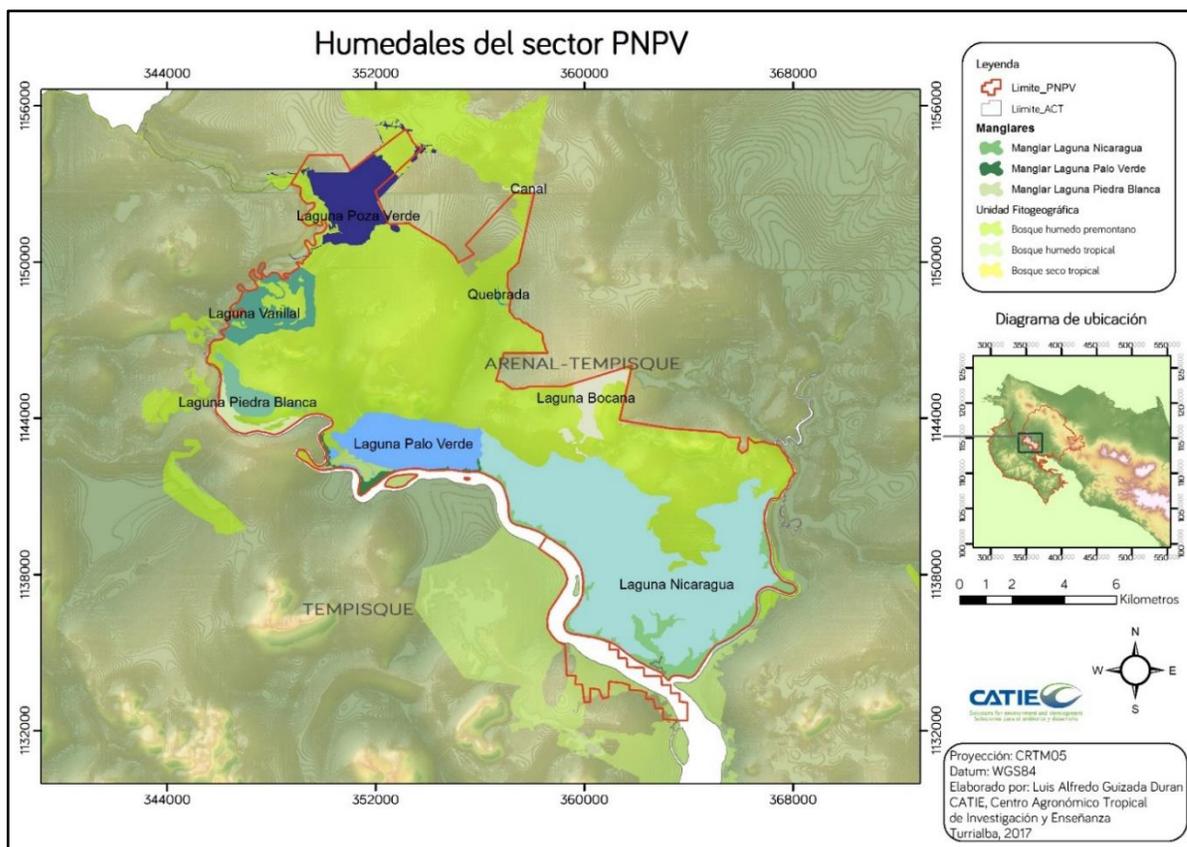


Figura 2. Área de estudio en el Humedal Protegido Internacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica
Fuente Atlas de Costa Rica 2014

El ACAT abarca, de oeste a este, desde Playa Grande a la desembocadura del río Tempisque; y de norte a sur, desde la cordillera Volcánica de Guanacaste y la cordillera de Tilarán a la costa de la península de Nicoya, cubriendo un gradiente altitudinal de 0 a 1018 msnm en sus 552 mil hectáreas (SINAC 2017).

El HPII-PV tiene una extensión de 19 800 ha de las cuales al menos el 60% está cubierto por humedales estacionales y permanentes (Trama *et al.* 2009). Sin embargo, el Proyecto Humedales (2017) del Minae, menciona que el 45,2% de la extensión dentro del HPII-PV corresponde a humedales, ocupando el 34,6% de la cobertura del suelo; el 48,62% corresponde a bosques y el restante 6,4% se reparte en charrales, cultivos, pastos y terrenos descubiertos. Asimismo, es fundamental para el anidamiento, descanso y migración de más de 60 especies de aves acuáticas. También es el hábitat principal del jabirú (*Jabiru mycteria*) en el país, donde anida con mayor seguridad por la alta degradación de los ambientes circundantes (Ramsar 1998).

Clima

El sector del PNPV se encuentra en una zona seca tropical, clima caracterizado por dos estaciones: un periodo seco con una duración de cinco meses (diciembre a abril) y una estación húmeda cuya duración es de siete meses (mayo a noviembre). Durante julio y agosto, las

precipitaciones se reducen a causa del denominado veranillo de San Juan, consecuencia del incremento en la velocidad de los vientos y del leve desplazamiento al sur de la zona de convergencia intertropical (Ramsar 1998).

Los valores climáticos tomados en la estación meteorológica del PNPV desde el 2008 hasta el 2017 por la Organización de Estudios Tropicales (OET), disponibles en línea, muestran una precipitación anual de $140,1 \text{ mm mes}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Octubre es el mes con las mayores precipitaciones, $407,6 \text{ mm año}^{-1}$ en promedio, mientras que las más bajas se reportaron para los meses de enero a marzo. El promedio de precipitaciones es menos de 8 mm en cada mes (OET 2017) (Figura 3A). En cuanto a la temperatura, el promedio anual es de $27,1^\circ\text{C}$, la temperatura promedio máxima es cerca del $27,5^\circ\text{C}$ y la mínima es $26,8^\circ\text{C}$. Marzo y abril muestran las temperaturas más altas con 29°C y las mínimas desde septiembre a diciembre, con cerca de 26°C (Figura 3B). El promedio de la humedad relativa media mensual es de $69,5\%$; en los meses secos desde enero a abril la humedad relativa se acerca a 57% y para el periodo húmedo el promedio es alrededor de $75,7\%$ (Figura 3C).

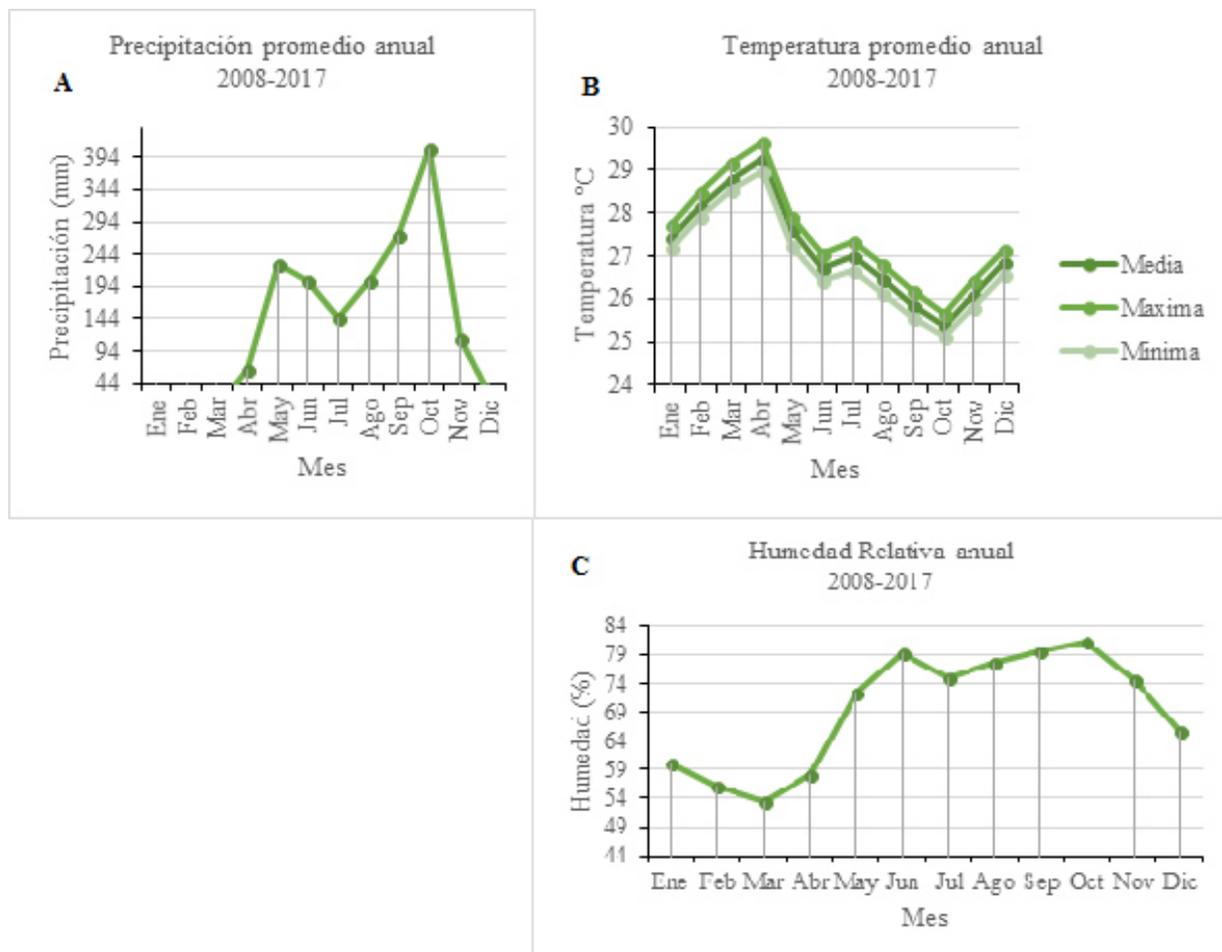


Figura 3. A. Precipitación promedio anual; B. Variación de la temperatura media anual con valores de temperatura media, máxima y mínima; C. Variación de la humedad relativa promedio anual en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

Fuente: en línea de la OET (2017)

2. Métodos

El trabajo fue realizado en el lapso de ocho meses. La EIE para los humedales del sector PNPV se basa en el marco conceptual propuesto por TNC (2003) y Parrish *et al.* (2003), con adaptaciones a ecosistemas de humedales de Faber-Langendoen *et al.* (2012b) y siguiendo las directrices de la guía metodológica para Costa Rica (SINAC 2016a). La metodología utilizada se resume en el esquema de la Figura 4 donde se sintetizó, organizó y priorizó el conocimiento existente de los humedales en el sector PNPV del HPII-PV a lo que se le denominó la creación del modelo ecológico conceptual (MEC) (objetivo 1). En el MEC establecido se pudieron identificar los componentes centrales para la EIE: (1) identificación de EFM, (2) identificación de AEC, (3) definición de indicadores, (4) identificación de los rangos aceptables de variación de cada indicador/atributo/elemento focal y (5) la calificación multiescala para finalmente realizar un ejercicio de EIE de los humedales del sector PNPV basado en los indicadores y la información actual como línea base (objetivo 4), dejando una lista y protocolos de indicadores potenciales para mejorar la evaluación a mediano y largo plazo.

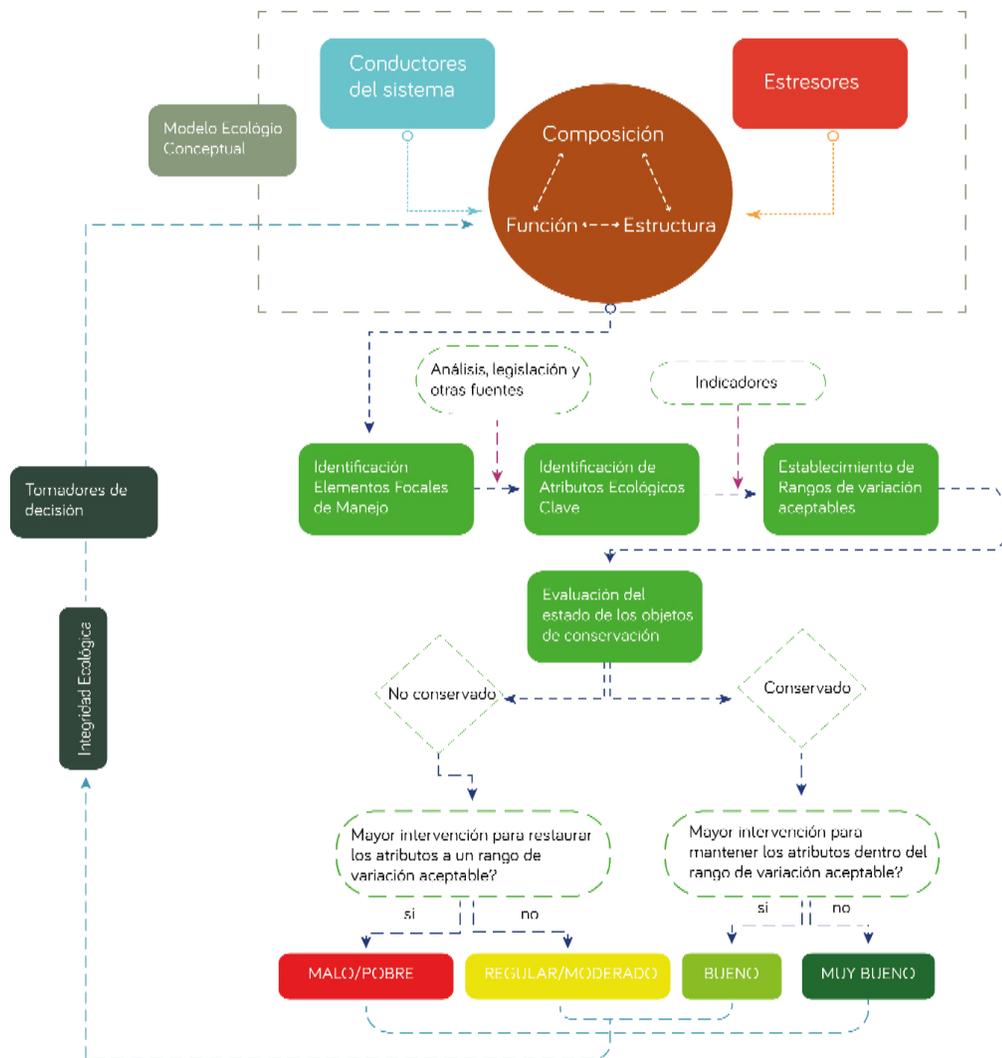


Figura 4. Marco metodológico de la evaluación de integridad ecológica para los humedales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica
Fuente: adaptado de TNC (2003), Herrera y Corrales (2004) y Tierney *et al.* (2009)

Definición del Modelo Ecológico Conceptual (Ob.1)

La identificación de los componentes centrales para la EIE requiere como primer paso una síntesis del conocimiento ecológico disponible. En este sentido, fue de particular utilidad la generación de un ensamble visual que describiera los componentes ecológicos más relevantes y sus interacciones (Parrish *et al.* 2003). Este modelo fue producto de la revisión bibliográfica sobre el sistema de humedales del sector PNPV, consulta a expertos y trabajo con técnicos del PNPV.

Para la creación del MEC se identificaron cuatro componentes principales: (1) la identificación de patrones recurrentes y/o conductores que determinan la funcionalidad del humedal; (2) la identificación de estresores y fuentes de estrés; (3) la identificación de los procesos ecológicos afectados por los estresores y; (4) el reconocimiento de los atributos (dinámicas ecológicas y/o taxones relevantes para el humedal) que están directamente vinculados con los estresores en el sistema.

La revisión bibliográfica para esta sección fue realizada con base en el análisis de 20 artículos relacionados al tópico de EIE en humedales obtenidos de repositorios de publicaciones (Annual Review, Springer, Elseiver, Google Scholar) y de organizaciones dedicadas a la protección de humedales como United States Environmental Protection Agency (EPA). La búsqueda en los diferentes repositorios fue realizada utilizando palabras claves como “humedales”, “integridad+ecológica” “modelo+conceptual” tanto en inglés como en español. A esta bibliografía se adicionaron cerca de 50 informes técnicos de Ramsar, Sinac, Minae, ACAT y OET sobre el HPII-PV y PNPV para desarrollar un modelo lo más ajustado posible a las condiciones de los humedales del sector PNPV.

Durante el proceso de la creación del MEC se contactó a los principales investigadores encargados de NatureServe (organización coordinadora de los programas de patrimonio natural en Estados Unidos que realizaron dos de los reportes más importantes bajo el marco de la EIE), a través del intercambio de correos. Los investigadores, debido a su experiencia en la creación de diferentes guías para la EIE en humedales fueron los encargados de retroalimentar la propuesta del MEC para los humedales del sector PNPV.

Definición de los componentes centrales para la evaluación de la integridad ecológica (Ob. 2)

Elementos focales de manejo (EFM)

Los EFM fueron identificados analizando los documentos publicados “Evaluación de ecorregiones de agua dulce en Mesoamérica”(TNC 2009), “El Plan General de Manejo del PNPV 2014-2024” (SINAC 2013) y “Priorización de elementos: elaboración del índice de naturaleza para los umedales Protegidos de Importancia Internacional para Costa Rica” (Martínez 2017), que proponen EFM a nivel eco-regional para la cuenca del río Tempisque, para la gestión del PNPV y para los humedales HPII, respectivamente.

Asimismo, se colaboró con expertos del Programa de Bosques, Biodiversidad y Cambio Climático del CATIE a través del Proyecto de Integridad Ecológica, el cual compartió la identificación y priorización de los EFM a nivel del área de conservación producto de talleres

participativos, para poder ser evaluados y colocados en nuestra propuesta. Un EFM fue utilizado si era considerado en todos los documentos marco revisados.

Atributos ecológicos clave (AEC)

Los AEC fueron identificados a nivel general en la sección del MEC; se basaron en el criterio de ser los elementos que capturan la estructura, composición y los procesos fundamentales del sistema y que ante la perturbación tanto natural como causada por el ser humano (estresores), las alteraciones de ese atributo más allá de algún rango crítico de variación conducirán a la degradación o pérdida de un EFM (Parrish *et al.* 2003; TNC 2009).

Los AEC de cualquier EFM incluyeron los siguientes elementos ecológicos fundamentales: (1) composición biológica y patrones de variación en el espacio que incluyen atributos relacionados con la abundancia de las especies y el espacio vital del EFM; y (2) regímenes ambientales y presiones que son atributos de la estructura del paisaje y sus características espaciales que sustentan la composición del EFM y su dinámica natural.

Selección de indicadores (Ob.2-3)

Los indicadores fueron definidos como “*características medibles de la estructura, composición o función de un sistema ecológico*”, cuya finalidad es medir la respuesta del ecosistema a perturbaciones en el sistema natural (Noss 1990; Young y Sanzone 2002; Niemi y McDonald 2004). Estos indicadores fueron identificados para cada AEC a través de una revisión bibliográfica de 40 artículos obtenidos de la revista especializada “*Ecological indicators*”- haciendo énfasis en indicadores para sistemas acuáticos- y en la revisión de la plataforma BIP (Biodiversity Indicators Partnership- <https://www.bipindicators.net/>).

Una lista de indicadores fue elaborada según la frecuencia de uso en la literatura. Durante una entrada a campo al PNPV realizada de enero a febrero, se realizaron reuniones con el personal técnico del parque (tres personas), investigadores de la OET (dos personas) y con personal eventual en el trabajo dentro del PNPV (dos personas), que por su grado de conocimiento y experiencia empírica/vivencial en el territorio fueron también incluidos. Estas reuniones tuvieron el objetivo de ajustar los indicadores a la situación real del sitio considerando el conocimiento de cada uno de los actores contemplados, reconociendo la priorización de amenazas, priorización de métricas y viabilidad en medición analizada con base en las limitaciones y capacidades tanto técnicas como financieras con las que cuenta el PNPV.

Al final se contó con una propuesta de indicadores más ajustada a la situación y requerimientos de los humedales del sector del PNPV sometida a evaluación a través del contacto personal vía correo electrónico a expertos en el tema de humedales, teniendo un trabajo conjunto con nueve personas involucradas de cinco instituciones (Anexo 1).

Clasificación de indicadores (Ob.2-3)

Como resultado de esta evaluación se estableció la lista de indicadores final para la EIE, los cuales fueron divididos en tres niveles según la posibilidad de implementación basada en los esfuerzos que ya realizan las organizaciones que trabajan dentro el sector del PNPV. Un primer nivel de medición actual, que incluyeron aquellas métricas medidas para el plan de monitoreo,

por estaciones meteorológicas y estaciones hidrológicas instaladas dentro del PNPV; (2^{do}) de implementación inmediata y necesaria, que son indicadores altamente recomendados por estudios publicados y por el criterio de expertos; y (3^{er}) potenciales para implementación, que corresponden a indicadores sugeridos por la bibliografía pero que por escasos de conocimiento y/o instrumentación, son sugeridos para su implementación en un futuro.

Validación del MEC, EFM e indicadores (Ob. 3)

Se organizó un taller en coordinación con el Proyecto de Integridad Ecológica del Sinac-CATIE-ACRXS en febrero de este año con el equipo técnico de las ACAT y ACT. En este participaron 10 personas de ambas áreas protegidas donde se trabajó en la lista ajustada de indicadores. Asimismo, dentro de este espacio de trabajo se presentó el MEC y los EFM para retroalimentar nuevamente estos componentes y con ellos poder priorizar los EFM según el grado de importancia que tienen en sus agendas de trabajo dentro de las áreas de conservación e identificar con ellos los indicadores que podrían ser medidos desde su percepción como técnicos que trabajan en el territorio con la finalidad de ajustar la lista de indicadores generados por el criterio de expertos y el respaldo bibliográfico..

Establecimiento de la línea base (Ob. 4)

La aplicación de la EIE fue realizada para los indicadores de primer nivel (composición de aves acuáticas, superficie de la vegetación invasora, estrés hídrico y estrés térmico), por contar con datos de varios años que nos permitieron incorporar la variabilidad temporal para determinar su estado de conservación y definir los rangos de variación aceptable dependiendo el tipo de indicador.

Determinación de rangos de variación aceptable de indicadores de primer nivel

Los rangos de variación para el indicador de composición de aves acuáticas fueron establecidos con base en un análisis de datos de riqueza de especies obtenido de literatura e informes de monitoreo de los humedales del sector del PNPV (Slud 1964; Slud 1980; Sánchez *et al.* 1985; Ramsar 1998; Hurtado 2003; Villareal Orias 2006; Umaña 2007; Ramsar 2012).

Para el indicador de comunidad de especies invasoras, los rangos de variación fueron establecidos con base en las sugerencias de las guías de EIE de U.S.EPA (Collins *et al.* 2006; Faber-Langendoen *et al.* 2012a; Rocchio *et al.* 2016) y el criterio de expertos dado por NatureServe y la revisión de los trabajos sobre cobertura de vegetación realizados en el territorio previamente (Castillo-Núñez y Guzmán Álvarez 2004; Trama 2005; Trama *et al.* 2009; Alonso *et al.* 2016).

Los rangos de variación aceptable para los indicadores de primer nivel referidos al estrés hídrico y térmico fueron determinados aplicando primeramente un modelo de serie de tiempo autorregresivo integrado de media móvil-ARIMA, utilizando los paquetes “*tseries*” (Trapletti y Hornik 2018) y “*forecast*” (Hyndman y Khandakar 2008; Hyndman 2017), corridos en el programa R (R Core Team 2017) con datos provenientes de la estación meteorológica de la OET para una periodo de 10 años. Los parámetros de ajuste (autorregresivo, diferenciación y media móvil), fueron calculados con la función automática propuesta por el modelo “*auto.arima*” que devuelve el mejor modelo ARIMA según el valor AIC, AICc o BIC. Este modelo ajustado fue el que permitió determinar los umbrales aceptables a 1, 1,96 y 3 desvíos estándar (DE) según lo

recomendado por Finegan *et al.* (2004) con respecto a la media móvil de los datos históricos, donde por definición se concentra el 68, 95 y 99% de los datos, respectivamente.

La rutina utilizada en el programa R y los gráficos producto del análisis para la observación de la variable en serie de tiempo y su comportamiento estacionario (supuestos y diagnóstico del análisis), son anexados en el Anexo 3. Vale mencionar que para la variable radiación que no mostraba una serie de tiempo estacional, los datos se ajustaron a una diferenciación de los datos iniciales.

Calificación del estado de conservación de EFM y AEC

Con la información más actual de composición de aves acuáticas con la que cuenta el PNPV, superficie de la vegetación invasora y datos climáticos provenientes de las estaciones meteorológicas, se realizó un ejercicio de la aplicación de los valores de calificación para cada indicador dentro de un rango de estado: *Muy Bueno*, *Bueno*, *Moderado* y *Pobre* para así completar la EIE de los EFM de los humedales del sector PNPV. La calificación de cada indicador se realizó utilizando las categorías y valores del Cuadro 3.

Presentación de los indicadores (Ob.2-3)

Al menos un indicador para cada AEC fue propuesto, definido y justificado en fichas individuales buscando literatura relacionada a cada indicador que respaldará el uso de éste y sea comprendido para su implementación (Anexo 2). Al mismo tiempo, estas fichas contienen los rangos de variación aceptable de cada indicador según rangos sugeridos por estudios previos, protocolos estandarizados de calidad de agua y/o recomendaciones bibliográficas que sirven como parámetro inicial, principalmente para los indicadores de segundo y tercer nivel.

Cuadro 3. Calificación de cada indicador del estado de conservación de los elementos focales de manejo y los atributos ecológicos clave y el valor a asignar, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

Fuente: Parrish *et al.* (2003)

Calificación	Valor	Descripción
Muy Bueno	4	El indicador se encuentra en un estado ecológicamente deseable, requiriéndose poca intervención humana para el mantenimiento de los rangos naturales de variación.
Bueno	3,5	El indicador se encuentra dentro de un rango de variación aceptable, aunque puede requerirse alguna intervención del hombre para su mantenimiento.
Regular/moderado	2,5	El indicador se encuentra fuera del rango de variación aceptable y requiere intervención humana para su mantenimiento. Si no se da seguimiento, el EFM será vulnerable a una degradación severa.
Malo/pobre	1	Si se permite que el indicador se mantenga en esta categoría a largo plazo hará de la restauración o prevención de desaparición del EFM prácticamente imposible (ej. complicado, costoso y con poca certeza para revertir el proceso de alteración).

V. RESULTADOS

5.1 Modelo ecológico conceptual para los humedales del sector PNPV

Como resultado de la revisión bibliográfica, consulta a expertos y trabajo crítico con los técnicos del PNPV, el modelo ecológico conceptual para los humedales del parque se centra en tres conductores clave que desencadenan estreses en sinergia que repercuten en efectos ecológicos importantes a medir. Estos conductores son el clima, uso de suelo y la hidrología y serán desglosados a continuación, explicando los diferentes componentes ecológicos e interacciones que fueron considerados para completar el modelo y fundamentan los indicadores propuestos (Figura 5).

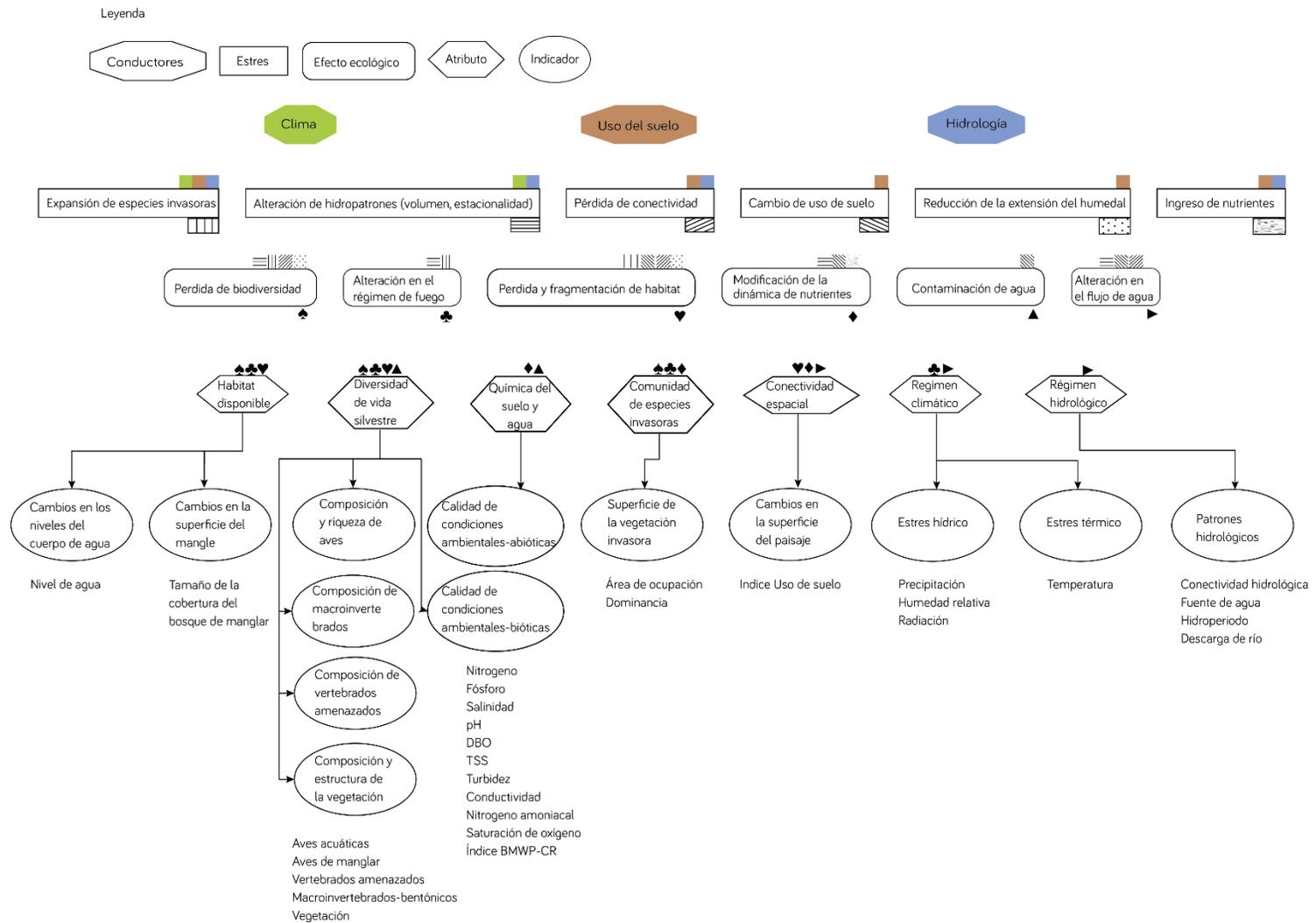


Figura 5. Modelo ecológico conceptual para el HPII-PV sector Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica. El modelo se fundamenta en conductores (resaltados a color) que generan diferentes estreses en el sistema (simbolizados por líneas y puntos), los cuales tienen un efecto en diferentes procesos ecológicos de manera conjunta o individual (símbolos). Estos procesos pueden ser monitoreados y controlados identificando atributos relevantes medido a través de indicadores.

5.1.1. Clima

El Niño oscilación Sur (ENOS) y el cambio climático

El efecto del fenómeno del Niño Oscilación Sur afecta las condiciones climáticas e hidrológicas en los humedales del sector PNPV (SINAC 2013). La impredecibilidad de este fenómeno, que trae sequías, tiene incidencia negativa mayor en los humedales, dado que repercute en la cantidad de precipitación, volumen del caudal de los ríos, desbordamientos y reducción de escorrentía (SINAC In. Prep.). Con base en los modelos de circulación global del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y los modelamientos de vegetación (IPCC 2013; Fung *et al.* 2017) para el 2050, la zona del noroeste de Costa Rica sugiere un aumento en la condición seca del sitio.

Así mismo, el cambio climático puede llegar a afectar la hidrología de los humedales. Por ejemplo, si la lluvia no llega en el periodo anual esperado o las sequías se prolongan por los cambios en las cuencas hidrográficas, o las capas freáticas descienden, los humedales tenderán a secarse, comprometiendo la sobrevivencia de especies dependientes del humedal. Asimismo, la construcción de represas, diques y otros impedimentos a los pulsos de agua podrían llevar a condiciones anóxicas extremas y una generación de gases aún mayor que la que ocurre durante las condiciones normales de pulsación del río (Altor y Mitsch 2006; Altor y Mitsch 2008; Mitsch *et al.* 2010).

5.1.2. Uso de suelo

Patrones del paisaje

Dentro del sitio Ramsar HP2-PV y dentro del sector PNPV, se encuentra una diversidad de coberturas de las cuales, los humedales y los bosques representan la mayor extensión (42,15% y 48,62%, respectivamente). El restante 6,38% son coberturas de charral, cultivos, pastos y terrenos descubiertos. Los humedales representan el 34,60% de la cobertura de la tierra y los manglares el 2,25% (Proyecto humedales SINAC-PNUD-GEF 2017).

Cultivos agrícolas

Hace más de una década los campos de cultivo destinados a caña se incrementaron considerablemente (de un 45% a un 70% en un periodo de siete años). Durante el 2008, tras el incremento en la importación de arroz, el establecimiento de este cultivo se intensificó de la misma forma (Jimenez 2016).

Los cultivos identificados cerca de los humedales del sector PNPV son los de caña (*Saccharum officinarum*) (0,17% de la superficie total), arroz (*Oryza sativa*) (0,63%), además de encontrar una gran proporción de pastizales para la actividad pecuaria (13,05%) (Proyecto humedales SINAC-PNUD-GEF 2017; SINAC In. Prep.). El uso agropecuario tiene un impacto directo en los humedales de Poza Verde y La Bocana, y de manera indirecta en Varillal, Piedra Blanca, Palo Verde y Nicaragua (SINAC In. Prep.). El uso intensivo de fertilizantes y agroquímicos que se descargan en el humedal, adicionado al exceso de agua por irrigación, altera la dinámica hidrológica natural de los humedales y la expansión de especies con comportamiento invasivo que provocan la reducción del espejo de agua de algunos humedales. (SINAC 2013).

El cultivo de arroz mejora las oportunidades de forrajeo para las aves acuáticas que vuelan entre los humedales y los campos adyacentes en respuesta a la pérdida de los humedales. Más del 50% de las especies son registradas en los cultivos y la mayoría de las especies compartidas (70%) son más abundantes en los campos (Jimenez 2016).

5.1.3. Hidrología

Los principales drenajes de los humedales del sector PNPV son el río Tempisque y sus tributarios, los ríos Bebedero y el Charco. La zona comprende terrenos planos sujetos a inundaciones estacionales producto de la precipitación local y de los desbordamientos del río Tempisque. Durante la época seca las mareas altas inundan los humedales a través de los canales naturales.

Los humedales del PNPV se encuentran estrechamente interconectados hidrológicamente. Las aguas fluyen aguas abajo, comenzando en el humedal Poza Verde, pasando a Varillal, y a través de Piedra Blanca, llegan a la Laguna Palo Verde y terminan en la Laguna Nicaragua. Este sistema cascada muestra la alta dependencia de los humedales entre ellos (Jimenez 2016).

Todos los humedales dentro del sector PNPV naturalmente reducen su superficie y el nivel de agua en la época seca (noviembre a abril), en su mayoría desaparecen. La estacionalidad climática es producto de la lluvia, del escurrimiento superficial de los bordes de las colinas aledañas y del secamiento por la gran tasa de evapotranspiración. La interacción entre las características climáticas e hidrológicas determina el volumen y profundidad del humedal dependiendo de la época del año. Durante la época seca, las mareas extremas del golfo de Nicoya posiblemente logren inundar los humedales (Vaughan *et al.* 1982; Vaughan *et al.* 1996; Ramsar 2012).

Durante los meses de sequía, las lagunas almacenan agua y reducen su superficie considerablemente. Por otra parte, los humedales del sector PNPV tienen su drenaje natural por el estero Chamorro; otros esteros que drenan parte del Parque son los esteros Desnudo, Fierro y Chirca, que corren hacia el río Tempisque, además de varias quebradas estacionales que se activan durante la época lluviosa, cuyos caudales y duración dependen de la intensidad de las precipitaciones (SINAC 2013).

Los ojos de agua importantes como Guayacán, Almendro, Coyol, Espíritu Santo, Saño, Bejuco, Avellanal, Cerritos, Oropopo son las únicas fuentes de agua para la fauna silvestre durante el periodo seco (SINAC 2013). A ellos se suman las medidas de adaptación al cambio climático realizadas en el PNPV como captadoras de agua de lluvia y bebederos artificiales.

5.1.4. Información vinculada a los conductores

Vinculado a cada uno de los tres conductores mencionados previamente, otros elementos, descritos a continuación, refuerzan el MEC para los niveles de estresores y atributos.

Vegetación

Se ha reportado para la región baja de la cuenca del río Tempisque más de 130 especies de plantas acuáticas (Crow 2002). A pesar de que la zona muestra ligeras variaciones topográficas,

esta afecta la composición del tipo de vegetación de la zona. En aguas poco profundas (<30-40 cm) es posible encontrar especies arbustivas como el palo verde (*Parkinsonia aculata*), *Echinodorus paniculatus* y juncos (*Eleocharis mutata*, *E. interstincta*, *Cyperus digitatus* y *C. giganteus*); entre 40-80 cm especies emergentes como *Thalia ganiculata*, *Cana glauca*, *Paspalum repens*, *Paspalidium germinatum*, *Ludwigia inclinata* y *Typha*; y especies flotantes como *Nymphaea pulchella*, *N. amazonum*, *Eichhornia crassipes*, *E. heterosperma*, *Neptunia natans*, *Sagittaria guyanensis*, *Pistia stratiotes*, *Limnobium laevigatum*, *Salvinia auriculata*, *Azolla microphylla*, *Nymphoides humboldtianum*, *Rynchospora corymbosa*, *Oxicrym cubense*, *Ludwigia pepiodes*, y *Pontederia rotundifolia* en aguas abiertas con profundidades mayores a 80 cm pero que desaparecen en la época seca (Crow 2002; Trama *et al.* 2009). Parches de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y mangle negro (*Avicennia germinans*) se ubican a la ribera de los ríos y son refugio de una amplia gama de especies silvestres (Sandoval y Sánchez 2011).

La dominancia y/o co-dominancia de especies en determinados humedales depende de la sinergia entre profundidad del agua, procesos geomorfológicos, perturbación histórica y la hidrología estacional (Jimenez 2016).

Fauna

A pesar de que la fauna no es endémica de los humedales, estos albergan especies interesantes ecológicamente como el cocodrilo americano (*Cocodylus acutus*) con la más alta densidad reportada para el país (entre 15,8 y 21,9 ind·km⁻²) (Jimenez 2016) y el reporte por parte de Pizarro y Rojas (1993) de especies exóticas como tilapia (*Oreochromis* sp.) que tiene un impacto desconocido en la cadena trófica y otras poblaciones de peces.

Los humedales de esta área son importantes para la alimentación y descanso de aves acuáticas residentes y migratorias, registrándose 60 especies (incluyendo 23 migrantes), entre ellas la garzilla verde *Butorides virescens*; la más abundante es el pijije común (*Dendrocygna autumnalis*) (Slud 1964; Slud 1980; Sánchez *et al.* 1985; Hurtado 2003; Villareal Orias 2006; Umaña 2007; Sandoval y Sánchez 2011; Jimenez 2016). También hay especies con algún grado de amenaza como el galán sin ventura (*Jabiru micterya*) y el pato real (*Cairina moschata*) que anidan en la zona.

Especies con comportamiento invasivo

Después de la declaración como parque nacional y la restricción en el ingreso del ganado a las lagunas del humedal, se observó el crecimiento acelerado de algunas especies acuáticas, principalmente la tifa (*Typha dominguensis*), gamalote de bajura (*Paspalidium genminatum*) y jengibrillo (*Paspallum notatum*), lo que conllevó a una reducción en la extensión de los espejos de agua en los humedales, así como un crecimiento acelerado de la zarza (*Mimosa pigra*) y el palo verde (*Parkinsonia aculeata*) (Castillo-Núñez y Guzmán Álvarez 2004; Trama 2005).

5.2 Componentes centrales para la evaluación de integridad ecológica

5.2.1 Elementos focales de manejo (EFM)

Dentro de la identificación de los componentes centrales para la EIE, tres EFM fueron reconocidos de un total de 39 identificados en publicaciones e informes revisados. Estos tres fueron aquellos que respondían al sistema de humedales y eran reconocidos por los documentos

evaluados para la región y para el sitio de estudio. Estos EFM fueron priorizados según su nivel de importancia -del más al menos importante- como: (1) ecosistemas palustres del sector PNPV, (2) ecosistema ribertino de la cuenca baja del río Tempisque y, (3) ecosistema estuarino del sector PNPV.

5.2.2 AEC, indicadores y métricas para la evaluación de integridad ecológica

Con el conocimiento sintetizado y priorizado, se priorizaron siete AEC que nos permiten monitorear los cambios que pueden ocurrir en cada EFM. Estos AEC están ligados a características de cada humedal como hábitat disponible, química del suelo y agua, biodiversidad que soporta; a amenazas importantes como la vegetación con comportamiento invasivo, conectividad espacial; y características ligadas al cambio climático como régimen climático y régimen hidrológico. Estos siete AEC son los más importantes en una primera etapa de evaluación, sin dejar de reconocer que otras características que están relacionadas a procesos que no son abordados directamente con los seleccionados, por ejemplo, dinámica de incendios, pueden ser añadidas en un futuro.

Como resultado del modelo conceptual los AEC y los indicadores fueron identificados con mayor facilidad. Estos últimos fueron diferenciados en tres niveles según el grado de información disponible por el PNPV y la OET, lo cual dio lugar a los indicadores de primer nivel o de medición actual. Los indicadores de segundo nivel fueron los de implementación necesaria y que se sugieren sean implementados a corto plazo; y los indicadores de tercer nivel corresponden a aquellos que pueden ser implementados en estadios más avanzados dependiendo de las condiciones operativas del PNPV. Una lista final de 13 indicadores que corresponden cinco 5 al primer nivel, cuatro 4 al segundo y seis 6 al tercero, fue propuesta como indicadores potenciales para la EIE como se observa en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Indicadores priorizados para la evaluación de integridad ecológica según su nivel de implementación en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

Nivel de implementación	Nombre del indicador
Primer nivel: Medición actual	Composición de aves acuáticas
	Superficie de la vegetación invasora
	Estrés hídrico
	Estrés térmico
Segundo nivel: Implementación inmediata-necesaria	Cambios en los niveles de agua
	Calidad de las condiciones ambientales (abióticas)
	Cambios en la superficie del paisaje
	Patrones hidrológicos
Tercer nivel: Potenciales para implementación	Cambios en la superficie de la cobertura del bosque de manglar
	Calidad de las condiciones ambientales (bióticas)
	Composición de macroinvertebrados
	Composición de vertebrados amenazados
	Composición y estructura de la vegetación
Patrones hidrológicos	
Composición de aves (manglar)	

5.2.3 Descripción de los indicadores

Una lista final de 13 indicadores ajustados a la situación de los humedales del sector PNPV fueron aceptados por las diferentes fuentes utilizadas (uso en la literatura, consulta a expertos, opinión de empíricos en el sitio y técnicos de gobierno). El Cuadro 5 resume la justificación primordial de cada uno de los indicadores propuestos.

Cuadro 5. Lista de indicadores y su justificación dentro de la propuesta de EIE, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica

Indicador	Justificación
Cambios en los niveles del cuerpo de agua	Los humedales en el sector PNPV naturalmente son estacionales. La interacción entre las características climáticas e hidrológicas determinan el volumen y profundidad del humedal. Al efecto de la dinámica de facilitación mutua entre las especies invasoras <i>Typha</i> y <i>Parkinsonia</i> , los niveles de agua y los periodos de inundación se han visto afectados seriamente por varias décadas.
Composición de aves acuáticas	Los humedales del PNPV se constituyen como los más importantes del país debido a la importancia que ejercen en la alimentación y descanso de cerca de 60 especies aves acuáticas y migratorias, característica ecológica que llevó a la declaración como sitio Ramsar y al reconocimiento de área importante para la conservación de las aves en Costa Rica.
Superficie de la vegetación invasora	En Palo Verde es notable el crecimiento acelerado de algunas especies acuáticas, principalmente de tifa (<i>Typha dominguensis</i>), gamalote de bajura (<i>Paspalidium genminatum</i>) y jengibrillo (<i>Paspallum notatum</i>), que llevó a una contracción de los espejos de agua en los humedales, así también un crecimiento acelerado de la zarza (<i>Mimosa pigra</i>) y el palo verde (<i>Parkinsonia aculeata</i>) a consecuencia de ello.
Estrés hídrico	Los principales componentes del importe hidrológico de un humedal son la precipitación, la evapotranspiración, las inundaciones y las mareas. En la región del Pacífico la distribución mensual de las lluvias es menos uniforme, por ello, las mediciones de cambios en la precipitación deben incluirse en programas de monitoreo.
Estrés térmico	La temperatura en ambientes ribereños es importante debido al efecto que ejerce en procesos físicos, químicos y biológicos. En ecosistemas de manglar, un daño significativo de caída de hojas o mortalidad masiva de árboles ocurre cuando las temperaturas incrementan su valor.
Calidad de las condiciones ambientales (abióticas y bióticas)	La determinación de la calidad de un cuerpo de agua se realiza con el análisis de componentes fisicoquímicos en términos de la relación concentración/impacto. Costa Rica evalúa la calidad de las aguas superficiales a través del “Índice holandés de valoración con tres parámetros: saturación de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno y el nitrógeno amoniacal. Un factor fundamental para la evaluación de la calidad de los cuerpos de agua en humedales es la valoración de fertilidad utilizando principalmente la concentración de N y P. El incremento del nivel del mar amenaza los manglares. La salinidad, es un factor útil de medición ya que se constituye como un factor perjudicial para muchas especies por lo que se considera un factor que influye en la composición de las especies. Este factor actúa como un estrés para las plantas provocando un decrecimiento en las tasas de crecimiento, reduce la diversidad de especies tanto de plantas como de macroinvertebrados repercutiendo sobre taxones más altos en la cadena trófica.
Cambios en la superficie del paisaje	La intensidad de la actividad humana en el paisaje tiene un impacto proporcional en los procesos ecológicos de los ecosistemas naturales. El cambio de uso de suelo alrededor de los humedales del sector PNPV compromete la calidad de agua de los humedales por la descarga de nutrientes y modificaciones en la conectividad funcional de los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres.
Patrones hidrológicos	Uno de los factores y quizás el más importante en el estudio de los humedales, es el agua. La composición biológica de un humedal depende de la forma de movimiento del agua dentro del mismo, es decir, de los procesos de entrada, movimiento y salida del agua a

Indicador	Justificación
	través del sistema. Conocer los aspectos hídricos predominantes en el sistema como: la fuente de agua, dinámicas de inundación o hidroperíodo y flujo de la corriente es fundamental en el estudio de la hidrología del sistema.
Cambios en la superficie de la cobertura de bosque de manglar	El alto valor que tienen los ecosistemas de manglar por los servicios ecosistémicos que brinda y el grado de amenaza que enfrentan a nivel mundial por la presión del sector agrícola compromete la persistencia de este tipo de ecosistemas, además del efecto del cambio climático hacen de estos ecosistemas importantes para un sistema de monitoreo. Asimismo, este tipo de ecosistema condicionada al flujo de los niveles de salinidad del agua y el suelo producto del efecto intermareal.
Composición de macroinvertebrados	Los macroinvertebrados son los organismos más utilizados como bioindicadores acuáticos muy adaptados a un entorno particular, haciéndolos susceptibles a factores estresantes como la falta de oxígeno o la alta salinidad.
Composición de vertebrados amenazados	Los humedales del sector del PNPV albergan una alta biodiversidad. Es posible valorar algunas especies como indicadores por su alta dependencia a hábitats particulares y/o por variaciones en presencia/ausencia incluso abundancia entre áreas diferentes. La presencia de poblaciones saludables podría indicar la ausencia de factores adversos en el ecosistema.
Composición y estructura de la vegetación	La integridad de los ecosistemas llega a su óptimo cuando la composición de sus especies originales domina la comunidad vegetal brindando un hábitat adecuado para múltiples especies de animales. Se considera que la vegetación es capaz de expresar sintéticamente el rango y el grado de estrés que enfrenta el humedal durante muchos años.

Cada AEC reconoce al menos uno de los factores importantes para que su medición sea realizada (tamaño, condición y/o contexto paisajístico). La mayor cantidad de indicadores validados en el trabajo con los técnicos y el taller son de tipo condición (ocho), indicadores con la categoría tamaño y contexto paisajístico tres y dos indicadores, respectivamente (Cuadro 6).

Cuadro 6 Listado de AEC, indicadores y métricas sugeridas a tres niveles de implementación para cada EFM aplicados para los humedales del Parque Nacional Parque Verde

AEC	Categoría	Indicador	Métrica
Nivel: medición actual			
<i>EFM: ecosistemas palustres del PNPV</i>			
Hábitat disponible	Tamaño	Cambios en los niveles de agua	Nivel del espejo de agua (cm)
Diversidad de vida silvestre	Condición	Composición de aves acuáticas	Abundancia y riqueza de aves acuáticas (análisis de # especies, # individuos, índices de diversidad)
Comunidad de especies invasoras	Tamaño	Superficie de la vegetación invasora	Área de ocupación (ha)
Régimen climático	Condición	Estrés hídrico	Precipitación (mm), humedad (%), radiación ($W \cdot m^{-2}$)
<i>EFM: ecosistemas riberos de la CBRT</i>			
Régimen climático	Condición	Estrés hídrico	Precipitación (mm), humedad (%), radiación ($W \cdot m^{-2}$)
	Condición	Estrés térmico	Temperatura ($^{\circ}C$)
<i>EFM: ecosistemas estuarinos del PNPV</i>			
Régimen climático	Condición	Estrés térmico	Temperatura ($^{\circ}C$)
Nivel: Implementación inmediata y necesaria			
<i>EFM: ecosistemas palustres del PNPV</i>			

AEC	Categoría	Indicador	Métrica
Química del suelo y agua	Condición	Calidad de condiciones ambientales (abióticas)	Nitrógeno (mg·l ⁻¹), Fósforo (mg·l ⁻¹), pH (valor), DBO (%), Saturación de oxígeno (%)
Conectividad espacial	Contexto paisajístico	Cambios en la superficie del paisaje	Índice de uso de suelo circundante
Régimen hidrológico	Contexto paisajístico	Patrones hidrológicos	Conectividad hidrológica (cualitativo) Fuente de agua (cualitativo) Hidroperíodo (cualitativo)
<i>EFM: ecosistemas ribeños de la CBRT</i>			
Régimen hidrológico	Contexto paisajístico	Patrones hidrológicos	Fuente de agua (cualitativo)
Química del suelo y agua	Condición	Calidad de condiciones ambientales (abióticas)	Turbidez (UNT), conductividad (μs·cm ⁻¹), DBO (%), saturación de oxígeno (%), nitrógeno amoniacal (mg·L ⁻¹)
<i>EFM: ecosistemas estuarinos del PNPV</i>			
Hábitat disponible	Tamaño	Cambios en la superficie de la cobertura del bosque de manglar	Tamaño bosque de mangle (ha)
Química del suelo y agua	Condición	Calidad de condiciones ambientales (abióticas)	Salinidad (ppm), oxígeno disuelto (%), sólidos suspendidos (%)
Régimen hidrológico	Contexto paisajístico	Patrones hidrológicos	Conectividad hidrológica (cualitativo) Fuente de agua (cualitativo)
Nivel: Potenciales para implementación			
<i>EFM: ecosistemas palustres del PNPV</i>			
Diversidad de vida silvestre	Condición	Composición de macroinvertebrados	Abundancia y riqueza de macroinvertebrados (análisis de # especies, # individuos)
		Composición de vertebrados amenazados	Abundancia y riqueza de reptiles, aves y mamíferos amenazados (análisis de # especies, # individuos, índices de diversidad)
<i>EFM: ecosistemas ribeños de la CBRT</i>			
Química del suelo y agua	Condición	Calidad de las condiciones ambientales (bióticas)	Índice BMWP-CR (valor de índice)
Régimen hidrológico	Contexto paisajístico	Patrones hidrológicos	Descarga de río (m ³ ·s ⁻¹)
<i>EFM: ecosistemas estuarinos del PNPV</i>			
Diversidad de vida silvestre	Condición	Composición de vertebrados amenazados	Abundancia y riqueza de reptiles, aves y mamíferos amenazados (# especies, # individuos, índices de diversidad)
		Composición de aves	Abundancia y riqueza de aves (# especies, # individuos, índices de diversidad)
		Composición y estructura de vegetación	Composición y estructura de especies de vegetación (análisis de # especies, # individuos, índices de diversidad)

5.3 Establecimiento de la línea base con los indicadores de medición actual

5.3.1 Rangos de variación aceptable determinados

Los rangos de variación aceptable de los indicadores de medición actual: composición de aves acuáticas, superficie de vegetación invasora, estrés hídrico y estrés térmico fueron establecidos para su futura calificación, y se mostrarán en la siguiente sección. A continuación, mostramos los valores encontrados por indicador con base en el análisis de los datos de monitoreo dentro de un máximo de 10 años.

Composición de aves acuáticas

El PNPV cuenta con un registro anual de la riqueza de especies de aves acuáticas en tres sitios de monitoreo continuo: el humedal Palo Verde, humedal Bocana y humedal Nicaragua. Para un lapso de seis años, los datos de riqueza en estos tres sitios oscilan de 21 (2012) a 50 (2016) especies para la laguna Palo Verde, de 9 (2017) a 18 (2012) especies para la laguna Bocana y hasta 39 (2016) especies para la laguna Nicaragua.

Durante este tiempo se pudo observar una notoria reducción en el número de especies en la laguna Bocana (Figura 6), posiblemente debido al nivel de ocupación de tifa que se describe en la siguiente sección. Por otro lado, los humedales Palo Verde y Nicaragua aumentaron el número de especies para los años 2015 y 2016, años que se realizaron las actividades de intervención de tifa para abrir el espejo de agua. Sin embargo, aún no se llega al número máximo histórico registrado de cerca de 60 especies asociadas al PNPV (Slud 1964; Slud 1980; Sánchez *et al.* 1985; Hurtado 2003; Villareal Orias 2006; Umaña 2007). Para los monitoreos del año 2017, todos los humedales muestran un declive con respecto a un año anterior, como lo menciona Chavarría¹ durante el año 2017 las actividades de intervención no fueron realizadas por limitaciones administrativas y por condiciones ambientales que mantuvieron al humedal inundado en temporadas secas.

¹Ulises Chavarría. 17 feb. 2018. Administrador del Parque Nacional Palo Verde. Comunicación personal. Cañas, Costa Rica

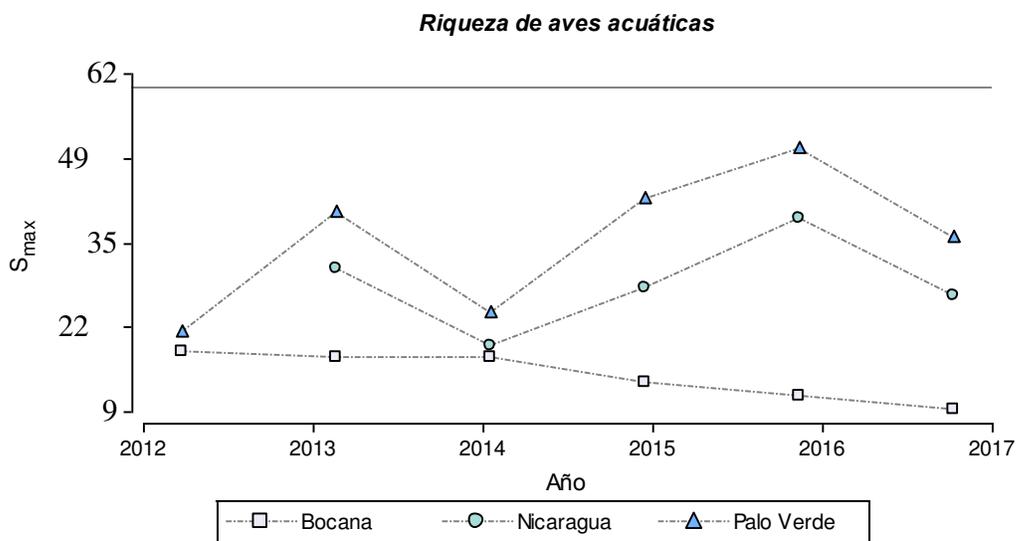


Figura 6. Riqueza de especies de aves en tres sitios del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica. La línea de corte en el eje de las abscisas es el máximo número histórico registrado.

El uso de la riqueza de especies llega a ser un indicador útil debido a dos temas importantes: primero, el comportamiento migratorio de las especies que ocurren en el sitio y segundo, la practicidad de medición. El primero nos permite contar con el registro de uso de hábitat de especies migratorias, las cuales son difíciles de monitorear debido a que su estado/condición no se limita a un determinado sitio, por lo que las fluctuaciones del número de individuos cada año es muy sensible a lo que pase fuera de los límites del PNPV (en este caso). Y su practicidad nos permite establecer unos rangos de variación más sencillos de valorar y tomar decisiones de conservación. A esto se suma la relevancia para el sitio, pues las aves se constituyen en una de las características ecológicas importantes para el HPII-PV y son relevante para la conservación del sitio según la percepción local.

Considerando la revisión de literatura y los datos de monitoreo de seis años, sugerimos establecer los rangos de variación de manera cualitativa. Por tanto, los rangos de variación aceptable para obtener el estado de calificación para este indicador se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Rangos de variación aceptable para el indicador de composición y riqueza de aves acuáticas en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

Calificación	Diversidad de especies
	Composición de especies de aves mínimamente no perturbada, es decir que cumplan las siguientes condiciones:
Muy bueno	i) Rangos típicos de número de especies presentes
	ii) Especies sensibles a la perturbación antropogénica presentes

Calificación	Diversidad de especies
Bueno	iii) Especies indicadoras de perturbaciones antropogénicas ausentes a menores
	Composición de especies de aves en condiciones menormente alteradas con alguna de las siguientes características:
	i) Algunas especies típicas ausentes o sustancialmente reducidas en su abundancia ii) Al menos algunas especies sensibles a la degradación antropogénica están presentes iii) Especies indicadoras de perturbaciones antropogénicas están presentes con poca representatividad
Regular/moderado	Composición de especies de aves con condiciones moderadamente alteradas, que cumplan alguna condición:
	i) Muchas especies típicas ausentes o sustancialmente reducidas en abundancia ii) Las especies indicadoras de perturbaciones antropogénicas están presentes con una representatividad moderada
Malo/pobre	Composición de especies de aves con condiciones severamente alteradas, que cumplan con alguna de las siguientes condiciones:
	i) La mayoría o todas las especies típicas están ausentes, algunas pueden permanecer en muy baja abundancia. ii) Las especies indicadoras de perturbaciones antropogénicas están presentes en altas densidades.

Superficie de la vegetación invasora

Los datos más actualizados con los que cuenta el PNPV y la OET (hasta diciembre del 2016), muestran que la tifa ocupa el 16% de la extensión total entre cuatro de los humedales del parque (1073,09 ha). Los niveles de ocupación son importantes en el humedal la Bocana que proporcionalmente ocupa cerca al 50% de la extensión, seguido del humedal Nicaragua (18%), Palo Verde y finalmente Poza Verde, ambos con menos del 10% de ocupación. Los bajos porcentajes de ocupación de tifa, principalmente en el humedal Palo Verde, pueden ser atribuidos a los esfuerzos de intervención realizados en los últimos años (desde el 2014).

Dentro de estos cuatro humedales la problemática de las especies con comportamiento invasivo es uno de los elementos más importantes a controlar para asegurar su permanencia. Si bien la tifa es la planta con mayor biomasa, la relación tifa-palo verde es muy importante a considerar ya que ambas muestran un impacto hidrológico importante. Estudios preliminares de Calvo Alvarado y Arias (2004) sugieren que los parches de palo verde (*P. aculeata*) implican una pérdida del 15% de la lluvia neta por captación, que en volúmenes de agua para el humedal es cerca al 8% del volumen de agua que requieren los humedales para llenarse.

La cuantificación de ocupación del palo verde y otras especies invasoras como la zarza, también debe ser realizada para tener un análisis más completo de la integridad con respecto al indicador de comunidad de especies invasoras, ya que son especies que, a pesar de tener menor biomasa, en relación con tifa, repercuten en la dinámica ecológica e hidrológica del humedal.

Cuadro 8. Porcentaje de ocupación de tifa con respecto a la extensión total del humedal, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica
Fuente Sinac (2016)

Humedal	Extensión humedal total (ha)	Tifa intervenida (ha)	Ocupación (%)	Detalle
Poza Verde	779,9	26,5	3,39	Tifa con platanilla
		Sub-total	3,39%	
Palo Verde	982,9	37,2 (219,7)	3,78	Tifa
		44,5	4,53	Tifa parcela de investigación
		Sub-total	8,31%	
Nicaragua	4682,8	793,1 (1121,9)	16,94	Tifa
		48,4	1,03	Tifa parcela de investigación
		Sub-total	17,97%	
Bocana	266,7	123,40 (0,87)	46,27	Tifa
		Sub-total	46,27%	
	PNPV 4 humedales	Total	15,99%	

Considerando que la tifa es una especie nativa y que a lo largo del tiempo varias especies de aves se adaptaron a su presencia como recurso de anidación, tales como el avetorillo pantanero (*Ixobrychus exilis*), la gallareta morada (*Porphyrio martinica*) y la gallareta frentirroja (*Gallinula chloropus*), o refugio (martinete coroninegro (*Nycticorax nycticorax*), martinete cabecipinto (*Nyctanassa violacea*), garcilla verde (*Butorides virescens*), garceta azul (*Egretta caerulea*) y garceta nivosa (*Egretta thula*)), es importante mantenerla en el paisaje². Por tanto, los rangos de variación permisible para este indicador son los establecidos por varios autores (Collins *et al.* 2006; Faber-Langendoen *et al.* 2012a; Rocchio *et al.* 2016) (Cuadro 9).

Cuadro 9. Rangos de variación aceptable para el indicador de superficie de la vegetación invasora en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

Calificación	Cobertura
Muy bueno	Las especies invasoras tienen una cobertura muy baja (<1% de cobertura absoluta)
Bueno	Las especies invasoras están presentes, pero de manera reducida (1-10% de cobertura absoluta)

²Julio Sánchez. 17 feb. 2017. Investigador de la Asociación ornitológica costarricense. Comunicación personal. San José, Costa Rica

Regular/moderado	Las especies de plantas invasoras son abundantes (10-30% de cobertura absoluta)
Malo/pobre	Las especies de plantas invasoras son muy abundantes (cobertura absoluta > 30%)

Estrés hídrico

Los indicadores de medición actual (indicadores de primer nivel) provenientes de las estaciones meteorológicas del PNPV (estrés térmico resultado de datos de temperatura y radiación solar y estrés hídrico generado por la precipitación y humedad relativa), analizados por el modelo ARIMA, permitieron calcular los parámetros descriptores del comportamiento de la variable (Cuadro 10). Más adelante se determinan los umbrales sugeridos para una serie de tiempo con una resolución mensual.

Cuadro 10. Serie ajustada a un modelo ARIMA identificando los parámetros autorregresivos y de media móvil generados automáticamente según datos climáticos de estaciones meteorológicas del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

Variable	Auto.arima	Coefficientes (estimado ± DE)	Sigma ²	AIC	BIC
Temperatura	(2,1,1) (2,0,0)	ar1 0,63 ± 0,0035 ar2 -0,03 ± 0,0040 ma1 -0,89 ± 0,0082 sar1 0,35 ± 0,0020 sar2 0,39 ± 0,0028	0,5641	289,32	306,1
Humedad relativa	(2,0,1) (2,0,0)	ar1 1,46 ± 0,1575 ar2 -0,63 ± 0,1113 ma1 -0,68 ± 0,1703 sar1 0,29 ± 0,0871 sar2 0,39 ± 0,0960 mean 69,45 ± 2,170	28,65	771,34	790,97
Precipitación	(1,0,0) (0,1,1)	ar1 0,30 ± 0,09 sma1 -0,86 ± 0,14	8283	1324	1332,1
Radiación solar	(2,0,2) (2,0,0)	ar1 -0,096 ± 0,1846 ar2 0,55 ± 0,1843 ma1 0,04 ± 0,1313 ma2 -0,84 ± 0,1343 sar1 0,27 ± 0,0904 sar2 0,39 ± 0,1153	526,4	1107,04	1126,55

Los umbrales establecidos a 1, 1,96 y 3 desvíos estándar con respecto a las variables climáticas históricas para los datos de temperatura, humedad relativa, precipitación y radiación solar son compilados en el Cuadro 11.

Si bien el registro histórico de los valores de precipitación, como variable más influyente en estos sistemas, ha oscilado entre 1500 y 2000 mm·año⁻¹ en más de 100 años (Ramsar 2012), los valores correspondientes al último año se incrementan en cerca de 200 mm anuales (2199,9 mm·año⁻¹, promedio 2017) pero con más meses de lluvia. Anteriormente, el 95% de las lluvias

se concentraban en 7 meses (mayo a noviembre), en los últimos dos años ese mismo porcentaje o más se concentra en 9 meses (abril a diciembre), mostrando una presumible pérdida de estacionalidad.

A nivel general, en el parque las condiciones ambientales según las variables meteorológicas tomadas muestran valores dentro de los umbrales de variación aceptable sugeridos según un análisis de serie de tiempo. La temperatura promedio durante el último año fue de 27°C, la humedad relativa del 68% y la precipitación acumulada anual de 2199,9 mm año⁻¹. Los datos de radiación solar promedio del último año (241,35 W·m⁻²) supera los valores recomendados del segundo umbral (3 DE).

Estos umbrales establecidos nos sirven como medidas de alerta temprana para determinar posibles cambios en características importantes en el sistema como los son el ingreso de aguas y estacionalidad, y presiones térmicas que afectan fundamentalmente a los ecosistemas estuarinos. Para los sistemas palustres y ribерinos, mediciones del estrés térmico de los cuerpos de agua serían más relevantes desde el punto de vista biológico.

Cuadro 11. Rangos de variación aceptable en base al análisis histórico de 10 años obtenidos con respecto a una media móvil a 1,96 y 3 desviaciones estándar.

Variable	Umbral superior a 1 DE	Umbral inferior a 1 DE	Umbral superior a 1,96 DE	Umbral inferior a 1,96 DE	Umbral superior a 3 DE	Umbral inferior a 3 DE
Temperatura (°C)	27,86	26,36	28,58	25,64	29,36	24,87
Humedad relativa (%)	74,01	63,30	79,15	58,7	84,72	52,60
Precipitación (mm·año ⁻¹)	2000	1500	2405,07	430,92	2928,83	-92,83
Radiación solar (W·m ²)	194,90	149,02	216,93	126,99	240,79	103,13

Con los umbrales establecidos a 1, 1,96 y 3 DE con respecto a la media móvil, los rangos de variación aceptables terminaron siendo fijados, según la calificación como se muestran en los cuadros 12 y 13 especificando, para el caso de temperatura, las variantes para cada EFM.

Cuadro 12. Rangos de variación permisible para el indicador de estrés hídrico en humedales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

Calificación	Estado
Precipitación (mm)	
Muy bueno	1500-2000
Bueno	2000-2500 o 430-1500
Regular/moderado	2500-3000 y <430
Malo/pobre	>2500
Humedad relativa (%)	
Muy bueno	63-74
Bueno	63-58 o 74-79
Regular/moderado	52-58 o 79-84
Malo/pobre	<50 o >84

Cuadro 13. Rangos de variación permisible para el indicador de estrés térmico con dos variantes en humedales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

Calificación	Estado variante: Riberino
	Temperatura (°C)
Muy bueno	26
Bueno	>26 a 28
Regular/moderado	<25 y 29-30
Malo/pobre	>30
	Radiación solar (W·m⁻²)
Muy bueno	<170
Bueno	170-216
Regular/moderado	216-240
Malo/pobre	>240
Calificación	Estado variante: Manglar
	Temperatura (°C)
Muy bueno	Temperatura mínima de 20°C y límite máximo tolerable de 38°C
Bueno	26
Regular/moderado	27-29
Malo/pobre	Temperatura <20 o > 38
	Radiación solar (W·m⁻²)
Muy bueno	<170
Bueno	170-216
Regular/moderado	216-240
Malo/pobre	>240

5.3.2 Calificación de estado de los AEC y EFM de los humedales del sector PNPV

Según la evaluación preliminar para los indicadores de primer nivel siguiendo la metodología de SINAC (2016a) y en base a los rangos de variación propuestos en la sección anterior, se estableció la calificación por AEC y EFM para cada uno de los humedales del sector PNPV. El Cuadro 14 muestra la calificación por indicador; se puede observar que el estado es “bueno” (2,8) para los ecosistemas palustres, “regular” (2,2) para los riberinos y “malo” (1) para los estuarinos.

Cuadro 14. Calificación del estado de cada indicador por EFM en humedales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

AEC	Categoría	Indicador	Estado	Meta
<i>EFM: Ecosistemas Palustres del PNPV</i>				
Diversidad de vida silvestre	Condición	Composición de aves acuáticas	Regular (2,5)	Bueno
Comunidad de especies invasoras	Tamaño	Superficie de la vegetación invasora	Regular (2,5)	Muy bueno
Régimen climático	Condición	Estrés hídrico	Bueno (3,5)	Bueno
			Promedio simple	Bueno (2,8)

EFM: Ecosistemas riberos de la CBRT

Régimen climático	Condición	Estrés hídrico	3,5	Bueno
	Condición	Estrés térmico	1	Bueno
		Promedio simple	Regular (2,2)	

EFM: Ecosistemas estuarinos del PNPV

Régimen climático	Condición	Estrés térmico	1	Bueno
		Promedio simple	Malo (1)	

Un punto importante que considerar en esta evaluación es la influencia de los valores de radiación en el indicador de estrés térmico. Los valores actuales de radiación ($247,5 \text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$) le otorgan a este indicador la calificación más baja. La implicancia de esta variable es la reacción en cadena que puede generar, ya que conceptualmente aumenta la evapotranspiración local, provocando un aumento en las condiciones de sequía y una proliferación de la planta palo verde que aumenta la captación de agua y baja los niveles de la misma en los humedales, facilitando la proliferación de la tifa al mismo tiempo (Jimenez 2016).

A pesar de tener una evaluación tan baja para los ecosistemas estuarinos, se debe reconocer que la evaluación con únicamente un indicador no refleja el estado del EFM por lo que destinar más esfuerzos a este tipo de ecosistemas debe ser importante, aunque sea el tercer EFM priorizado por los técnicos del PNPV.

VI. CONCLUSIONES

La metodología adoptada por Costa Rica y ajustada a ecosistemas de humedales según proponen Faber-Langendoen *et al.* (2012a) y Rocchio *et al.* (2016), la cual es plasmada en este documento, es una herramienta útil para la EIE del sistema de humedales del HPII-PV en el sector del PNPV. Estos humedales fueron conceptualizados en un modelo ecológico compuesto por los conductores que rigen el sistema, los cuales son el clima, el uso de suelo y la hidrología. Estos conductores repercuten en procesos ecológicos a través de seis estresores priorizados por académicos y técnicos y están relacionados al hidroperíodo, a especies con comportamiento invasivo y a la fertilidad en el sistema.

Como componentes centrales de la EIE se identificaron tres EFM de escala gruesa, siete AEC y 13 indicadores para la EIE de los humedales. Los EFM reconocidos y aceptados por los técnicos del PNPV como EFM iniciales para la EIE V son los (1) ecosistemas palustres, (2) ecosistemas riberos y (3) ecosistemas estuarinos; los mismos están alineados con las evaluaciones a nivel ecoregional y de planes de manejo del parque. Estos EFM son explicados en siete AEC que se relacionan con la biodiversidad que aloja, el control de especies con comportamiento invasivo, la disponibilidad de hábitat y el régimen hidrológico y son medidos a través de 13 indicadores con categorías de tamaño (3), condición (8) y contexto paisajístico (2).

El reconocimiento y la priorización de los diferentes componentes de la EIE por parte de académicos y técnicos del PNPV valida cada uno de los elementos para su aplicabilidad y ejecución en diferentes medidas que se vayan a realizar en el territorio, como planes de monitoreo y restauración y actualizaciones en los planes de manejo del área.

Finalmente, la línea base establecida a través de la calificación de los valores de estado de conservación de cada indicador, AEC y EFM nos dan un primer indicio sobre el estado de los humedales considerando muy pocos indicadores. Hay muchas amenazas de tipo natural y antrópico identificadas en el modelo conceptual que pueden ser evaluadas con indicadores de nivel 2 y 3.

VII. RECOMENDACIONES Y PASOS A SEGUIR

- Se recomienda establecer un plan u hoja de ruta que permita al personal del PNPV realizar acciones de monitoreo, mediante los indicadores de niveles 2 y 3, con el fin de evaluar cuestiones de calidad de los humedales y un análisis a nivel paisajístico más intensivo. Esto llevará a un mejoramiento en la EIE para cada AEC y EFM que actualmente, con la información disponible, no es realizada con suficiente precisión. Por ejemplo, en los ecosistemas palustres actualmente se miden condiciones ambientales y diversidad de aves (nivel 1), incorporar el conocimiento de las condiciones fisicoquímicas del agua (nivel 2) y finalmente evaluar la calidad de agua según la composición de macroinvertebrados (nivel 3) mejorará la evaluación sobre las condiciones ambientales del cuerpo de agua.
- Una alternativa para mejorar el reflejo de la integridad del ecosistema y efectivizar los sistemas de monitoreo para humedales, es identificar especies de cambio a diferentes condiciones de los AEC y enfocar los esfuerzos en grupos más reducidos, o gremios específicos.
- Considerar el monitoreo del grado de ocupación de zarza (*Mimosa pigra*) y palo verde (*Parkinsonia aculeata*), como otras especies invasoras que contribuyen a la degradación de los humedales dentro de PNPV, es necesario para cumplir con los criterios sugeridos en el indicador de comunidad de especies invasoras ya que los rangos de variación aceptable están definidos con respecto al total de especies invasoras que amenaza el sistema.
- Finalmente, recomendamos que la propuesta vaya actualizándose constantemente. Esta es una primera iniciativa para compilar todo el conocimiento reconocido y realizado en los humedales dentro del PNPV que, unido a iniciativas ya aprobadas como el plan de intervención y monitoreo, pueden servir como herramientas de evaluación y efectividad.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, A; Muñoz-Carpena, R; Kennedy, RE; Murcia, C. 2016. Wetland landscape spatio-temporal degradation dynamics using the new Google Earth Engine cloud-based platform: Opportunities for non-specialists in remote sensing. *Transactions of the ASABE*. 59(5):1331-1342.
- Altor, AE; Mitsch, WJ. 2006. Methane flux from created riparian marshes: relationship to intermittent versus continuous inundation and emergent macrophytes. *Ecological Engineering*. 28(3):224-234. doi 10.1016/j.ecoleng.2006.06.006
- Altor, AE; Mitsch, WJ. 2008. Pulsing hydrology, methane emissions and carbon dioxide fluxes in created marshes: a 2-year ecosystem study. *Wetlands*. 28(2):423-438. doi 10.1672/07-98.1
- Bonilla, D. 2016. Sistematización del proceso de manejo activo en la rehabilitación del Humedal Importancia Internacional Palo Verde, en el sector del Parque Nacional Palo Verde, Área de Conservación Arenal Tempisque. Proyecto humedales MINAE-SINAC-PNUD-GEF (ed.) San José, Costa Rica, MINAE-SINAC. 149 p.
- Calvo Alvarado, JC; Arias, O. 2004. Restauración hidrológica del humedal Palo Verde. *Ambientico*.(129):7-8.
- Castillo-Núñez, M; Guzmán Álvarez, JA. 2004. Cambios en cobertura vegetal en Palo Verde según SIG. *Ambientico*.(129):4-6.
- Collins, JN; Stein, ED; Sutula, M; Clark, R; Fetscher, AE; Grenier, L; Grosso, C; Wiskind, A. 2006. California Rapid Assessment Method (CRAM) for Wetlands and Riparian Areas. 136 p. (Version 4.2.3).
- Cowardin, LM; Carter, V; Golet, FC; LaRoe, ET. 1979. Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. US Department of the Interior, US Fish and Wildlife Service.
- Crow, GE. 2002. Plantas Acuáticas del Parque Nacional Palo Verde y el Valle del Río Tempisque. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica, INBio. 300 p.
- Davidson, NC. 2014. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Mar. Freshw. Res.*(65):936–941.
- EEM. 2005. Los Ecosistemas y El Bienestar Humano: Humedales y Agua, Informe de Síntesis. Washington, DC., World Resources Institute. 80 p. Disponible en http://www.millenniumassessment.org/documents/MA_WetlandsandWater_Spanish.pdf
- Faber-Langendoen, D; Hedge, C; Kost, M; Thomas, S; Smart, L; Smyth, R; Drake, J; Menard, S. 2012a. Assessment of Wetland Ecosystem Condition across Landscape Regions: A

Multi-metric Approach Part A. Ecological Integrity Assessment Overview and Field Study in Michigan and Indiana.

- Faber-Langendoen, D; Rocchio, J; Thomas, S; Kost, M; Hedge, C; Nichols, B; Walz, K; Kittel, G; Menard, S; Drake, J; Muldavin, E. 2012b. Assessment of Wetland Ecosystem Condition across Landscape Regions: A Multi-metric Approach Part B. Ecological Integrity Assessment Protocols for Rapid Field Methods (L2).
- Fung, E; Imbach, P; Corrales, L; Vilchez, S; Zamora, N; Argotty, F; Hannah, L; Ramos, Z. 2017. Mapping conservation priorities and connectivity pathways under climate change for tropical ecosystems. *Climatic Change*. 141(1):77-92.
- Herrera, B; Corrales, L. 2004. Midiendo el éxito de las acciones en las áreas protegidas de Centroamérica: Evaluación y Monitoreo de Integridad Ecológica. Guatemala de la Asunción, Guatemala, PROARCA/APM. 44 p.
- Hu, S; Niu, Z; Chen, Y; Li, L; Zhang, H. 2017a. Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. *Science of The Total Environment*. 586:319-327.
- Hu, S; Niu, Z; Chen, Y; Li, L; Zhang, H. 2017b. Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. *Science of The Total Environment*.(586):319-327. doi 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001
- Hurtado, J. 2003. Abundancia, diversidad, riqueza uso de habitat y comportamiento de aves acuáticas: Una comparación entre un humedal seminatural y un arrozal con riesgo en Costa Rica. Tesis Maestría. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional.
- Hyndman, R; Khandakar, Y. 2008. Automatic time series forecasting: the forecast package for R. *Journal of Statistical Software*. 26(3):1-22.
- Hyndman, R. 2017. forecast: Forecasting functions for time series and linear models (R package version 8.2). Disponible en <http://pkg.robjhyndman.com/forecast>
- IPCC. 2013. Resumen para responsables de políticas. *In* Stocker, TF; D. Qin; Plattner, G-K; M.Tignor; Allen, SK; Boschung, J; Nauels, A; Xia, Y; Bex, V; Midgley, PM (eds.). Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América., Cambridge University Press. p.
- Jimenez, J. 2016. Chapter 20: Bogs, Marshes, and Swamps of Costa Rica. *In* Kappelle, M (ed.). Costa Rican Ecosystems. Chicago, University of Chicago Press. p. 683-705.
- Keddy, P. 2010a. Wetlands: An overview. *In* Wetland Ecology: Principles and Conservation Cambridge, Cambridge University Press. p. 1-41. Disponible en 10.1017/CBO9780511778179.003

- Keddy, P. 2010b. Flooding. *In Wetland Ecology: Principles and Conservation*. Cambridge University Press. p. 42-77. Disponible en doi:10.1017/CBO9780511778179.004
- Keddy, P. 2010c. Fertility. *In Wetland Ecology: Principles and Conservation* Cambridge, Reino Unido, Cambridge in press. p. 78-107.
- Keddy, P. 2010d. Other factors. *In Wetland Ecology: Principles and Conservation*. Cambridge, Reino Unido, Cambridge in press. p. 213-233.
- Martínez, D. 2017. Priorización de elementos: elaboración del índice de naturaleza para los Humedales Protegidos de Importancia Internacional para Costa Rica. Ed. SINAC-PNUD-GEF. San José, Costa Rica 19 p.
- MINAE. 2016. Política Nacional de Humedales 2017-2030. Costa Rica, San Jose 96 p.
- Mitra, S; Wassmann, R; Vlek, PL. 2003. Global inventory of wetlands and their role in the carbon cycle. ZEF Discussion Papers on Development Policy.
- Mitsch, WJ; Nahlik, A; Wolski, P; Bernal, B; Zhang, L; Ramberg, L. 2010. Tropical wetlands: seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions. *Wetlands ecology and management*. 18(5):573-586. doi 10.1007/s11273-009-9164-4
- Mitsch, WJ; Gosselink, JG. 2015. *Wetlands*. 5th ed. Hoboken, New Jersey, Wiley. 747 p. Disponible en <http://booksupport.wiley.com>
- Moreno, C. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. Zaragoza, España, M&T–Manuales y Tesis SEA. 84 p.
- Mutch, L; Goldin Rose, M; Heard, A; Schweizer, D; Martens, S; Werner, H; Stock, S; Kaczynski, K; Caprio, T; Haultain, S; van Wagendonk, J; Rowlands, R; Thompson, S; Rachowicz, L. 2008. Appendix F: . *In Ecosystem Conceptual Models Sierra Nevada Network vital signs monitoring plan: Appendices A-F*. Natural Resource Report.
- Niemi, GJ; McDonald, ME. 2004. Application of ecological indicators. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 35:89-111.
- Noss, RF. 1990. Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation biology*. 4(4):355-364.
- Ogden, JC; Davis, SM; Jacobs, KJ; Barnes, T; Fling, HE. 2005. The use of conceptual ecological models to guide ecosystem restoration in South Florida. *Wetlands*. 25(4):795-809.
- Organización de Estudios Tropicales (OET). 2017. Estación meteorológica Palo Verde. San José, Costa Rica, Disponible en <http://www.ots.ac.cr/meteoro/default.php?pestacion=1>

- Parrish, JD; Braun, DP; Unnasch, RS. 2003. Are we conserving what we say we are? Measuring ecological integrity within protected areas. *BioScience*. 53(9):851-860.
- Pizarro, J; Rojas, J. 1993. Presencia de tilapia, *Oreochromis* (Pisces: Cichlidae) en la desembocadura del río Bebedero, Golfo de Nicoya, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*. 41(3B):921-924.
- Proyecto humedales SINAC-PNUD-GEF. 2017. Valoración de los servicios ecosistémicos que ofrecen siete de los humedales protegidos de importancia internacional en Costa Rica: Palo Verde, Caribe Noreste, Caño Negro, Gandoca-Manzanillo, Mequenque, Terraba-Sierpe y Las Baulas. . Ed. SINCA/CINPE-UNA/PNUD. 144 p.
- R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, (R Foundation for Statistical Computing). Disponible en <https://www.R-project.org/>.<https://www.R-project.org/>.
- Ramsar. 1998. Sitio Ramsar Parque Nacional Palo Verde Costa Rica. Gland, Suiza, RAMSAR. 36 p.
- Ramsar. 2007. Qué son los humedales? Gland, Suiza, RAMSAR. 2 p. (Documento Informativo). no. 1. Disponible en <http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/info2007sp-01.pdf>
- Ramsar. 2010. Uso Racional de Los Humedales. Gland, Switzerland, 64 p. (Manual). no. 1. Disponible en <http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/hbk4-01sp.pdf>
- Ramsar. 2012. Misión de asesoramiento No. 73 Humedal de Importancia Internacional Palo Verde, Costa Rica. 30 p.
- Ramsar. 2016. The Fourth Ramsar Strategic Plan 2016–2024. 5th ed. Gland, Switzerland, (Ramsar handbooks for the wise use of wetlands). no. 2.
- Ramsar. 2017. Actualización sobre el estado de los sitios de la Lista de Humedales de Importancia Internacional. Gland, Suiza, 42 p. no. SC53-18.
- Rocchio, FJ; Crawford, RC; Ramm-Granberg, T. 2016. Field Manual for Applying Rapid Ecological Integrity Assessments in Wetlands and Riparian Areas in Washington State.
- Russi, D; ten Brink, P; Farmer, A; Badura, T; Coates, D; Förster, J; Kumar, R; Davidson, N. 2013. The economics of ecosystems and biodiversity for water and wetlands. IEEP, London and Brussels.78.
- Sánchez, J; Rodríguez, JM; Salas, C. 1985. Distribución, ciclos reproductivos y aspectos ecológicos de aves acuáticas. *In* Ministerio de Agricultura y Ganadería; Dirección Forestal; Subdirección de Vida Silvestre (eds.). Investigaciones sobre fauna silvestre de Costa Rica. San José, Costa Rica, Universidad Estatal a Distancia. p. 83-102.

- Sandoval, L; Sánchez, C. 2011. Áreas Importantes para la Conservación de las Aves de Costa Rica. San José, Costa Rica, Unión de Ornitólogos de Costa Rica. 196 p.
- SINAC. 2012. Memoria taller de expertos Palo Verde. Taller Palo Verde Costa Rica. 54 p.
- SINAC. 2013. Plan General de Manejo del Parque Nacional Palo Verde. Volumen I - Diagnóstico. Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT). Guanacaste, Costa Rica 209 p.
- SINAC. 2016a. Marco conceptual y guía metodológica para la Integridad ecológica en Áreas Silvestres Protegidas de Costa Rica. San José, Costa Rica. 40 p.
- SINAC. 2016b. Plan Específico de Manejo de Recursos Naturales del Parque Nacional Palo Verde 2016-2017. Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT). Guanacaste, Costa Rica, 44 p.
- SINAC. 2017. Area de Conservación Tempisque. San José, Costa Rica, Disponible en <http://www.sinac.go.cr>.<http://www.sinac.go.cr>.
- SINAC. In Rev. Plan de Intervención y Monitoreo de los Humedales del Parque Nacional Palo Verde 2017-2021. San José, Costa Rica, 37 p.
- SINAC. In. Prep. Diagnóstico del impacto del uso del suelo en los alrededores del PNPV. San José, Costa Rica, 233 p.
- Slud, P. 1964. The birds of Costa Rica, distribution and ecology. Bulletin of the American Museum of Natural History. 128:
- Slud, P. 1980. The birds of Hacienda Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica. Smithsonian Contributions to Zoology. 292:
- Solís, H. 1991. Hidrología de los humedales. Seminario Móvil Internacional de Áreas Protegidas (VII, Turrialba, Costa Rica, CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 20 p.
- The Nature Conservancy (TNC). 2003. Methods for Evaluating Ecosystem Integrity and Monitoring Ecosystem Response. 21 p.
- Tierney, GL; Faber-Langendoen, D; Mitchell, BR; Shriver, WG; Gibbs, JP. 2009. Monitoring and evaluating the ecological integrity of forest ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 7(6):308-316.
- TNC. 2009. Evaluación de ecorregiones de agua dulce en Mesoamerica, sitios prioritarios para la conservación en las ecorregiones de Chiapas a Darién San José, Costa Rica 520 p. (Programa de Ciencias Regional, Región de Mesoamerica y El Caribe).

- Trama, FA. 2005. Manejo activo y restauración del Humedal Palo Verde: Cambios en las coberturas de vegetación y respuesta de las aves acuáticas. Heredia, Costa Rica Universidad Nacional de Costa Rica.
- Trama, FA; Rizo-Patrón, FL; Kumar, A; González, E; Somma, D. 2009. Wetland cover types and plant community changes in response to cattail-control activities in the Palo Verde Marsh, Costa Rica. *Ecological Restoration*. 27(3):278-289.
- Trapletti, A; Hornik, K. 2018. tseries: Time Series Analysis and Computational Finance (R package version 0.10-43).
- Umaña, E. 2007. Fluctuaciones temporales en la diversidad y abundancia relativa de aves acuáticas en el Refugio Natural de Vida Silvestre Laguna Mata Redonda y Humedal Corral de Piedra, Costa Rica. Tesis Licenciatura. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional.
- Vaughan, C; Canessa, G; McCoy, M; Rodríguez, M; Bravo, J; Sánchez, J; Morales, R; Hawkins, T; Crozier, E; Shaffer, D; Rodriguez, M; Hodgson, F. 1982. Refugio de Fauna Silvestre (Palo Verde), Plan de manejo y desarrollo. Heredia, Costa Rica EUNA. 272 p.
- Vaughan, C; McCoy, M; Fallas, J; Chávez, H; Barboza, G; Wong, G; Rau, J; Carranza, M; Carbonell, M. 1996. Plan de Manejo y Desarrollo del Parque Nacional Palo Verde y Reserva Biológica Lomas Barbudal. San Jose, Costa Rica Universidad Nacional. 215 p. (Contrato SENARA-BID-MIRENEM-UNA).
- Villareal Orias, J. 2006. Aves acuáticas del Refugio de Vida Silvestre Laguna Mata Redonda, Costa Rica *Zeledonia*. 10:13-34.
- Young, TF; Sanzone, S. 2002. framework for assessing and reporting on ecological condition. Washington, DC, EPA-SAB-EPEC-02-009. 142 p.
- Zedler, JB; Kercher, S. 2005. Wetland resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. *Annual Review Environmental Resources*. 30:39-74. doi 10.1146/annurev.energy.30.050504.144248

IX. ANEXOS

Anexo 1. Lista de los expertos, instituciones y personas consideradas para la creación, modificación, aceptación del proceso completo de EIE

Nombre	Institución	Cargo	Contacto
Lenin Corrales	CATIE	Líder Unidad de Modelado Ecosistémico e Hidrológico	lenin.corrales@catie.ac.cr
Ulises Chavarría García	SINAC-ACAT	Administrador Parque Nacional Palo Verde	ulises.chavarria@sinac.go.cr
Isaac López Ardiles	SINAC-ACAT	Coordinador programa de investigación	isaac.lopez@sinac.go.cr
Mauricio Marín Murillo	SINAC-ACAT	Técnico apoyo	mauricio.marin@sinac.go.cr
Juan Marcial Serrano Sandí	Organización de Estudios Tropicales	Proyectos de Informática para la Biodiversidad y SIG	juan.serrano@tropicalstudies.org
Mahmood Sasa	Organización de Estudios Tropicales	Ex-director OET	msasamarin@gmail.com
Eugenio González J. Ph.D.	Texas A&M University	The Soltis Center for Research and Education in Costa Rica “Connecting research in lowland and highland tropical environments”	egonzalez.soltis.center@tamu.edu
Patrick J. McIntyre, PhD	NatureServe	Senior Ecologist, Western North America	Patrick_McIntyre@natureserve.org
Don Faber-Langendoen	NatureServe	Senior Ecologist, Northeastern North America	don_faber-langendoen@natureserve.org
Edgardo Alfredo Aragón Solera	Independiente	Personal eventual-trabajos dentro PNPV	--
Juan David Ruiz Solera	Independiente	Personal eventual-trabajos dentro PNPV	--

Anexo 2. Protocolos por indicador.

Indicadores de primer nivel. Medición actual

Indicador: Cambios en los niveles del cuerpo de agua.

Categoría: Tamaño.

Atributo Ecológico Clave: Hábitat disponible.

Elemento Focal de Manejo: Ecosistema palustre del PNPV.

Objetivo

Medir los cambios en los niveles de agua en los cuerpos hídricos de los humedales.

Descripción y justificación del indicador

Todos los humedales dentro del Parque Nacional Palo Verde naturalmente reducen su superficie y nivel de agua en la época seca (noviembre a abril), en su mayoría desaparecen. La estacionalidad climática es producto de la lluvia, del escurrimiento superficial de los bordes de las colinas aledañas y del secamiento por la gran tasa de evapotranspiración. La interacción entre las características climáticas e hidrológicas determinan el volumen y profundidad del humedal dependiendo la época del año. Durante la época seca, las mareas extremas del Golfo de Nicoya es posible que logren inundar los humedales (Vaughan *et al.* 1982; Vaughan *et al.* 1996; RAMSAR 2012). Debido al efecto de la dinámica de facilitación mutua entre las especies invasoras *Typha* y *Parkisonia*, los niveles de agua y los periodos de inundación se han visto afectados seriamente por varias décadas (Jimenez 2016).

Al mismo tiempo, el cambio climático afecta el régimen de lluvias y escorrentía poniendo en riesgo las entradas y los pulsos de inundación que alimentan los diferentes humedales. Monitorear los niveles de aguas superficiales resulta en un potencial indicador de alerta temprana a efectos del cambio climático y a la vez como respuesta de los esfuerzos de restauración que se realizan en algunos de los humedales.

Variable

Nivel del agua sobre la superficie.

Unidades de medición

Centímetros (cm).

Protocolos de medición

La medición de los niveles de agua en los diferentes humedales se medirá con una estación hidrológica fija o *Data logger* multisensorial que captura los datos y los transmite a un servidor central que puede ser consultado virtualmente desde cualquier computador.

Rangos de variación

Calificación	Nivel de agua
Muy bueno	
Bueno	
Regular/moderado	
Malo/pobre	

Referencias Bibliográficas

- Jimenez, J. 2016. Chapter 20: Bogs, Marshes, and Swamps of Costa Rica. *In* Kappelle, M (ed.). *Costa Rican Ecosystems*. Chicago, University of Chicago Press. p. 683-705.
- RAMSAR. 2012. Misión de asesoramiento No. 73 Humedal de Importancia Internacional Palo Verde, Costa Rica. 30 p.
- Vaughan, C; Canessa, G; McCoy, M; Rodríguez, M; Bravo, J; Sánchez, J; Morales, R; Hawkins, T; Crozier, E; Shaffer, D; Rodriguez, M; Hodgson, F. 1982. Refugio de Fauna Silvestre (Palo Verde), Plan de manejo y desarrollo. Heredia, Costa Rica EUNA. 272 p.
- Vaughan, C; McCoy, M; Fallas, J; Chávez, H; Barboza, G; Wong, G; Rau, J; Carranza, M; Carbonell, M. 1996. Plan de Manejo y Desarrollo del Parque Nacional Palo Verde y Reserva Biológica Lomas Barbudal. San Jose, Costa Rica Universidad Nacional. 215 p. (Contrato SENARA-BID-MIRENEM-UNA).

Indicador: Composición de aves acuáticas-

Categoría: Condición

Atributo Ecológico Clave: Diversidad de vida silvestre

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas palustres del PNPV; ecosistemas ribeños de la CBRT; ecosistemas estuarinos del PNPV

Objetivo

Mantener y asegurar la diversidad de aves acuáticas residentes y migratorias en los diferentes humedales del PNPV.

Descripción y justificación del indicador

Varios aspectos de la ecología de las aves acuáticas los hacen útiles como bioindicadores. Se ha demostrado que las aves acuáticas rastrean las variaciones ambientales a escalas temporales cortas (meses) y largas (años), tanto a nivel de especie como de comunidad (por ejemplo, (Nudds 1983; Abraham y Sydeman 2004; Almaraz y Amat 2004; Rendón *et al.* 2008). De igual forma, debido a que muchas especies son depredadores superiores y varios contaminantes a menudo se acumulan a lo largo de la cadena trófica, este grupo puede usarse como indicadores de cambios que ocurren a niveles tróficos más bajos (por ejemplo, (Matsinos y Wolff 2003; Burger y Eichhorst 2005).

La composición de las especies de aves y la diversidad en general pueden, por lo tanto, actuar principalmente como un indicador de la alteración del uso del suelo, la fragmentación del hábitat y otras influencias humanas (Amat y Green 2010). Aunque las aves acuáticas pueden identificarse fácilmente, tienen un alto valor social y un historial de vida bien conocido, son muy móviles y muchas veces se ven más afectadas por las características del hábitat (por ejemplo, superficie del agua, vegetación) y la estación que por la calidad del agua (Van den Broeck *et al.* 2015)

Los humedales del PNPV se constituyen como los más importantes del país debido a la importancia que ejercen en la alimentación y descanso de cerca de 60 especies aves acuáticas y migratorias (Slud 1964; Slud 1980; Sánchez *et al.* 1985; Hurtado 2003; Villareal Orias 2006; Umaña 2007), característica ecológica que llevó a la declaración como sitio Ramsar (RAMSAR 1998) y al reconocimiento de área importante para la conservación de las aves en Costa Rica (Sandoval y Sánchez 2011).

Variable

Riqueza (S), curva de acumulación de especies e índices de diversidad (Shannon e inverso de Simpson)

Unidades de medición

Número (#) de especies y valor de índice de Shannon (H) e índice inverso de Simpson (S_{inv}).

Protocolos de medición

Las observaciones de aves serán realizadas con el método de puntos de conteo y transectos lineales de muestreo, metodologías ya estandarizadas dentro del PNPV y llevadas a cabo según el protocolo de muestreo generado por el programa de investigación del Parque (Isaac 2013).

La periodicidad es fijada a cuatro meses en el año (diciembre, enero, febrero y marzo) periodo clave por las condiciones ambientales (inicio de época seca) y por la visita de aves migratorias. Los recorridos y puntos de conteo serán programados según el cronograma de monitoreo.

Rangos de variación

Calificación	Diversidad de especies
Muy bueno	Composición de especies de aves (abundancia y diversidad de especies) mínimamente no perturbada, es decir que cumplan las siguientes condiciones: i) Rangos típicos de número y abundancia de especies presentes. ii) Especies sensibles a la perturbación antropogénica presentes. iii) Especies indicadoras de perturbaciones antropogénicas ausentes a menores.
Bueno	Composición de especies de aves en condiciones menormente alteradas con alguna de las siguientes características: i) Algunas especies típicas ausentes o sustancialmente reducidas en su abundancia. ii) Al menos algunas especies sensible a la degradación antropogénica están presentes iii) Especies indicadoras de perturbaciones antropogénicas están presentes con poca representatividad
Regular/moderado	Composición de especies de aves con condiciones moderadamente alteradas, que cumplan alguna condición: i) Muchas especies típicas ausentes o sustancialmente reducidas en abundancia.

	ii) Las especies indicadoras de perturbaciones antropogénicas están presentes con una representatividad moderada.
Malo/pobre	Composición de especies de aves con condiciones severamente alteradas, que cumplan con alguna de las siguientes condiciones: i) La mayoría o todas las especies típicas están ausentes, algunas pueden permanecer en muy baja abundancia. ii) Las especies indicadoras de perturbaciones antropogénicas están presentes en altas densidades.

Referencias Bibliográficas

- Abraham, CL; Sydeman, WJ. 2004. Ocean climate, euphausiids and auklet nesting: inter-annual trends and variation in phenology, diet and growth of a planktivorous seabird, *Ptychoramphus aleuticus*. *Marine Ecology Progress Series*. 274:235-250.
- Almaraz, P; Amat, JA. 2004. Multi-annual spatial and numeric dynamics of the white-headed duck *Oxyura leucocephala* in southern Europe: seasonality, density dependence and climatic variability. *Journal of Animal Ecology*. 73(6):1013-1023.
- Amat, JA; Green, AJ. 2010. Waterbirds as bioindicators of environmental conditions. Springer. 45-52 p.
- Burger, J; Eichhorst, B. 2005. Heavy metals and selenium in grebe eggs from Agassiz National Wildlife Refuge in northern Minnesota. *Environmental monitoring and assessment*. 107(1-3):285-295.
- Hurtado, J. 2003. Abundancia, diversidad, riqueza uso de habitat y comportamiento e aves acuáticas: Una comparación entre un humedal seminatural y un arrozal con riesgo en Costa Rica. Tesis Maestría. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional.
- Isaac, LN. 2013. Protocolo de monitoreo de aves en humedales. San Jose, Costa Rica SINAC-ACT. 9 p.
- Matsinos, YG; Wolff, W. 2003. An individual-oriented model for ecological risk assessment of wading birds. *Ecological modelling*. 170(2-3):471-478.
- Nudds, TD. 1983. Niche dynamics and organization of waterfowl guilds in variable environments. *Ecology*. 64(2):319-330.

- RAMSAR. 1998. Sitio Ramsar Parque Nacional Palo Verde Costa Rica. Gland, Suiza, RAMSAR. 36 p.
- Rendón, MA; Green, AJ; Aguilera, E; Almaraz, P. 2008. Status, distribution and long-term changes in the waterbird community wintering in Doñana, south-west Spain. *Biological Conservation*. 141(5):1371-1388.
- Sánchez, J; Rodríguez, JM; Salas, C. 1985. Distribución, ciclos reproductivos y aspectos ecológicos de aves acuáticas. *In* Ministerio de Agricultura y Ganadería; Dirección Forestal; Subdirección de Vida Silvestre (eds.). Investigaciones sobre fauna silvestre de Costa Rica. San José, Costa Rica, Universidad Estatal a Distancia. p. 83-102.
- Sandoval, L; Sánchez, C. 2011. Áreas Importantes para la Conservación de las Aves de Costa Rica. San José, Costa Rica, Unión de Ornitólogos de Costa Rica. 196 p.
- Slud, P. 1964. The birds of Costa Rica, distribution and ecology. *Bulletin of the American Museum of Natural History*. 128:
- Slud, P. 1980. The birds of Hacienda Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica. *Smithsonian Contributions to Zoology*. 292:
- Umaña, E. 2007. Fluctuaciones temporales en la diversidad y abundancia relativa de aves acuáticas en el Refugio Natural de Vida Silvestre Laguna Mata Redonda y Humedal Corral de Piedra, Costa Rica. Tesis Licenciatura. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional.
- Van den Broeck, M; Waterkeyn, A; Rhazi, L; Grillas, P; Brendonck, L. 2015. Assessing the ecological integrity of endorheic wetlands, with focus on Mediterranean temporary ponds. *Ecological Indicators*. 54:1-11.
- Villareal Orias, J. 2006. Aves acuáticas del Refugio de Vida Silvestre Laguna Mata Redonda, Costa Rica *Zeledonia*. 10:13-34.

Indicador: Superficie de la vegetación invasora.

Categoría: Tamaño.

Atributo Ecológico Clave: Comunidad de especies vegetales invasoras.

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas palustres del PNPV.

Objetivo

Controlar la expansión de las especies invasoras sobre los cuerpos de agua como medida de compresión del humedal.

Descripción y justificación del indicador

Muchas plantas de humedales se ajustan a la definición de "plantas invasoras" como especies o cepas que aumentan rápidamente su distribución espacial (Richardson *et al.* 2000). Zedler y Kercher (2004) propone que los humedales son vulnerables a la invasión en parte porque funcionan como "sumideros" de paisaje que acumulan materiales resultantes de perturbaciones tanto terrestres como de humedales (exceso de agua, nutrientes, sedimentos, sales, metales pesados, otros contaminantes y desechos) y al mismo tiempo suministra a los invasores los recursos necesarios para su proliferación monotípica.

En Palo Verde es notable el crecimiento acelerado de algunas especies acuáticas, principalmente de tifa (*Typha dominguensis*), gamalote de bajura (*Paspalidium genminatum*) y jengibrillo (*Paspallum notatum*), que llevó a una contracción de los espejos de agua en los humedales, así también un crecimiento acelerado de la zarza (*Mimosa pigra*) y el Palo Verde (*Parkinsonia aculeata*) a consecuencia de ello (Castillo-Núñez y Guzmán Álvarez 2004; Trama 2005; Jimenez 2016).

Todos los esfuerzos de intervención y restauración comenzados en los 2000, entre los cuales se pudo remover matas de 370 ha de humedal y que anualmente se van realizando tuvieron una respuesta inmediata en la visita de aves acuáticas en la estación seca siguiente por la recuperación de los espejos de agua (Trama 2005).

Variable

Superficie cubierta de vegetación invasora en el humedal.

Unidades de medición

Porcentaje de cobertura absoluta total.

Protocolos de medición

Para que la medición sea lo más consistente posible, se debe establecer una lista completa de especies invasoras. El protocolo utiliza una evaluación visual de la cobertura absoluta de especies invasoras, cada cobertura por especie se suma para tener la cobertura total de especies de plantas invasoras (Rocchio *et al.* 2016).

La metodología en campo propuesta es un método semi-cuantitativo a través de sobrevuelos con vehículos no tripulados (drone) que registra el grado de ocupación de las diferentes especies invasoras analizando las imágenes obtenidas del vuelo sobre cada humedal.

Rangos de variación

Calificación	Cobertura
Muy bueno	Las especies invasoras tienen una cobertura muy baja (<1% de cobertura absoluta)
Bueno	Las especies invasoras están presentes, pero de manera reducida (1-10% de cobertura absoluta)
Regular/moderado	Las especies de plantas invasoras son abundantes (10-30% de cobertura absoluta)
Malo/pobre	Las especies de plantas invasoras son muy abundantes (cobertura absoluta > 30%)

Rangos sugeridos por Collins *et al.* (2006) y Faber-Langendoen *et al.* (2012)

Referencias Bibliográficas

Castillo-Núñez, M; Guzmán Álvarez, JA. 2004. Cambios en cobertura vegetal en Palo Verde según SIG. *Ambientico*.(129):4-6.

Collins, JN; Stein, ED; Sutula, M; Clark, R; Fetscher, AE; Grenier, L; Grosso, C; Wiskind, A. 2006. California Rapid Assessment Method (CRAM) for Wetlands and Riparian Areas. 136 p. (Version 4.2.3).

Faber-Langendoen, D; Hedge, C; Kost, M; Thomas, S; Smart, L; Smyth, R; Drake, J; Menard, S. 2012. Assessment of Wetland Ecosystem Condition across Landscape Regions: A Multi-metric Approach Part A. Ecological Integrity Assessment Overview and Field Study in Michigan and Indiana.

Jimenez, J. 2016. Chapter 20: Bogs, Marshes, and Swamps of Costa Rica. *In* Kappelle, M (ed.). *Costa Rican Ecosystems*. Chicago, University of Chicago Press. p. 683-705.

Richardson, DM; Pyšek, P; Rejmánek, M; Barbour, MG; Panetta, FD; West, CJ. 2000. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and distributions*. 6(2):93-107.

Rocchio, FJ; Crawford, RC; Ramm-Granberg, T. 2016. Field Manual for Applying Rapid Ecological Integrity Assessments in Wetlands and Riparian Areas in Washington State.

Trama, FA. 2005. Manejo activo y restauración del Humedal Palo Verde: Cambios en las coberturas de vegetación y respuesta de las aves acuáticas. Heredia, Costa Rica Universidad Nacional de Costa Rica.

Zedler, JB; Kercher, S. 2004. Causes and consequences of invasive plants in wetlands: opportunities, opportunists, and outcomes. *critical Reviews in Plant sciences*. 23(5):431-452.

Indicador: Estrés hídrico.

Categoría: Condición.

Atributo Ecológico Clave: Régimen Climático.

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas palustres del PNPV; ecosistemas ribeños de la CBRT.

Objetivo

Evaluar las fluctuaciones ambientales relacionadas al ingreso de aguas dulces e identificar si son atribuibles al cambio climático.

Descripción y justificación del indicador

Los principales componentes del importe hidrológico de un humedal son la precipitación, los flujos de entradas y salidas de agua, el flujo de aguas subterráneas, la evapotranspiración, las inundaciones y las mareas. Todos ellos contribuyen al transporte de energía y nutrientes desde y hacia los humedales e influyen indirectamente en la química de los suelos y en la selección final de la biota en los humedales (Mitsch y Gosselink 2015).

Los ríos en el lado de la costa del Pacífico de América Central son más cortos y más estacionales que sus contrapartes en el lado caribeño del istmo. Como resultado de esto y del clima predominante, la distribución mensual de las lluvias es más uniforme en el lado del Mar Caribe (Atlántico) que en el lado Pacífico, por tanto, los humedales cerca de la costa del Pacífico tienden a ser muy estacionales con veranos húmedos e inviernos secos (Mitsch y Gosselink 2015).

Durante siglos, la medición de la precipitación diaria total es estándar, sin embargo, presenta una alta variabilidad espacial y temporal. Por ello, las mediciones de cambios en la precipitación deben incluirse en programas de monitoreo (IPCC 2013; MMA-CTCN-CATIE-ICRAF 2016).

La humedad del aire es la concentración de vapor de agua, su medición es de gran importancia porque afecta al balance de radiación (efecto invernadero), origina los fenómenos de condensación y sublimación y tiene un comportamiento inverso con la temperatura (MMA-CTCN-CATIE-ICRAF 2016).

Variable

Precipitación y humedad relativa.

Unidades de medición

Mm mes⁻¹ año⁻¹. Porcentaje (%).

Protocolos de medición

Las mediciones de las variables ambientales son realizadas por medio de la instalación de estaciones meteorológicas colocadas en la superficie de cada ecosistema de interés de manera que sean representativas del sector y aseguren una cobertura meteorológica del sitio representativa.

Rangos de variación

Calificación	Estado
Precipitación	
Muy bueno	1500-2000
Bueno	2000-2700 o 662-1500
Regular/moderado	2700-3239 y 662-122,43
Malo/pobre	< 122o >2700
Humedad relativa	
Muy bueno	
Bueno	52-58 o 79-84
Regular/moderado	
Malo/pobre	<50 o >84

Referencias Bibliográficas

- IPCC. 2013. Resumen para responsables de políticas. *In* Stocker, TF; D. Qin; Plattner, G-K; M.Tignor; Allen, SK; Boschung, J; Nauels, A; Xia, Y; Bex, V; Midgley, PM (eds.). Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América., Cambridge University Press. p.
- Mitsch, WJ; Gosselink, JG. 2015. Wetlands. 5th ed. Hoboken, New Jersey, Wiley. 747 p. Disponible en <http://booksupport.wiley.com><http://booksupport.wiley.com>
- MMA-CTCN-CATIE-ICRAF. 2016. Diseño de una Red de Monitoreo de Biodiversidad y Cambio Climático. Santiago-Chile. Ministerio de Ambiente de Chile, Climate Technology Centre and Network, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, World Agroforestry Centre. 172 p.

Indicador: Estrés térmico.

Categoría: Condición.

Atributo Ecológico Clave: Régimen climático.

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas ribерinos de la CBRT; ecosistemas estuarinos del PNPV.

Objetivo

Identificar variaciones y tendencias de las variables climáticas relacionadas a temperatura y ver si son atribuibles al cambio climático.

Descripción y justificación del indicador

La temperatura en ambientes ribereños es importante debido al efecto que ejerce en procesos físicos (volatilización, solubilidad de sales y gases como el oxígeno), en procesos químicos (pH, equilibrio de ionización o concentración de amoníaco, velocidades de reacción) y en procesos biológicos (tasa metabólica, descomposición de materia orgánica) y, por lo tanto, repercute en el efecto de los agentes contaminantes (Pérez-Castillo y Rodríguez 2008). Asimismo, Malekmohammadi y Blouchi (2014) hacen referencia que altas temperaturas y alta evaporación incrementan las condiciones químicas y las tasas funcionales biológicas además de reducir la riqueza de especies acuáticas, principalmente en zonas de agua dulce. Históricamente, es uno de los parámetros medidos mundialmente por reflejar de manera clara los cambios en el clima regional y global (MMA-CTCN-CATIE-ICRAF 2016).

En ecosistemas de manglar, un daño significativo de caída de hojas o mortalidad masiva de árboles ocurre en condiciones donde la temperatura media del aire supera los 38°C y daños en la fauna de manglares cuando la temperatura del aire o del agua supera los 31°C. Las temperaturas atmosféricas más altas se asocian también con el calentamiento del suelo, los patrones climáticos alterados y el aumento del nivel del mar, todo lo cual podría influir profundamente en el crecimiento del manglar y la mortalidad de este (Ellison y Farnsworth 1996).

Los bosques de mangle habitan zonas de latitudes tropicales con una radiación solar alta, estas características provocan que la tasa fotosintética sea baja naturalmente. La baja fotosíntesis junto con altos niveles de radiación condiciona al mangle a fotoinhibiciones que deben ser evitadas (Powles 1984).

Variable

Temperatura y radiación solar.

Unidades de medición

Grados centígrados, W m⁻².

Protocolo de medición

Las mediciones de las variables ambientales son realizadas por medio de la instalación de estaciones meteorológicas colocadas en la superficie de cada ecosistema de interés de manera que sean representativas del sector y aseguren una cobertura meteorológica del sitio.

Rangos de variación

Calificación	Estado variante: Fluvial
Temperatura (°C)	
Muy bueno	26
Bueno	26-28
Regular/moderado	<24 y 29-30
Malo/pobre	>30
Radiación solar	
Muy bueno	<170
Bueno	170-216
Regular/moderado	216-240
Malo/pobre	>240
Calificación	Estado variante: Manglar
Temperatura (°C)	
Muy bueno	Temperatura mínima de 20 y límite máximo tolerable de 38
Bueno	26
Regular/moderado	27-29
Malo/pobre	Temperatura <20 o > 38
Radiación solar	
Muy bueno	<170
Bueno	170-216
Regular/moderado	216-240
Malo/pobre	>240

Referencias Bibliográficas

- Ellison, AM; Farnsworth, EJ. 1996. Anthropogenic disturbance of Caribbean mangrove ecosystems: past impacts, present trends, and future predictions. *Biotropica*.549-565.
- Malekmohammadi, B; Blouchi, LR. 2014. Ecological risk assessment of wetland ecosystems using multi criteria decision making and geographic information system. *Ecological Indicators*. 41:133-144.
- MMA-CTCN-CATIE-ICRAF. 2016. Diseño de una Red de Monitoreo de Biodiversidad y Cambio Climático. Santiago-Chile. Ministerio de Ambiente de Chile, Climate Technology Centre and Network, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, World Agroforestry Centre. 172 p.
- Pérez-Castillo, AG; Rodríguez, A. 2008. Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. *Revista de Biología Tropical*. 56(4):1905-1918.
- Powles, SB. 1984. Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light. *Annual review of plant physiology*. 35(1):15-44.

Indicadores de segundo nivel. Implementación inmediata y necesaria

Indicador: Calidad de las condiciones abióticas del sistema. **Categoría:** Condición.

Atributo Ecológico Clave: Química del agua y suelo.

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas palustre del PNPV; ecosistemas ribeños de la CBRT; ecosistemas estuarinos del PNPV.

Objetivo

Monitorear cambios en los parámetros fisicoquímicos en los diferentes humedales.

Descripción y justificación del indicador

La determinación de la calidad de un cuerpo de agua usualmente se lleva a cabo por medio del análisis de una cantidad grande de indicadores. Normalmente se expresan en diferentes rangos, distintas unidades y tienen diferente comportamiento en términos de la relación concentración/impacto (Abbasi 2002; Brenes 2013).

Costa Rica evalúa la calidad de las aguas superficiales a través del “Índice holandés de valoración de la calidad para los cuerpos de agua superficiales”, aprobado por decreto N°25018-MEIC publicado en el Diario Oficial La Gaceta N° 59 del 25 de marzo de 1996. El índice se basa en la obtención de un puntaje de acuerdo con tres parámetros utilizados: el porcentaje de saturación de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno y el nitrógeno amoniacal (MINAE 2007).

En cuanto a los nutrientes, estos son llevados a los humedales por los aportes hidrológicos de la precipitación, las inundaciones de los ríos, las mareas y las entradas de aguas superficiales y subterráneas. El hidropérido de un humedal tiene un efecto significativo en las transformaciones de nutrientes, en la disponibilidad de nutrientes para la vegetación y en la pérdida de nutrientes de los suelos de los humedales que tienen formas gaseosas (Mitsch y Gosselink 2015).

Al poseer la capacidad de retener y transformar los nutrientes por los procesos biogeoquímicos, la excesiva carga de nutrientes provenientes de la agricultura y la escorrentía urbana (especialmente nitrógeno y fósforo) son los conductores clave para promover la invasión por macrófitas dominantes en los humedales (Davis *et al.* 2000; Zedler y Kercher 2004).

Varios estudios han demostrado que la aplicación de herbicidas en humedales invadidos aumenta la disponibilidad de nutrientes (Martin *et al.* 2010; Freeland *et al.* 2013; Lawrence *et al.* 2016), su uso puede promover la re-invasión y causar eutrofización (Schindler *et al.* 2008; Conley *et al.* 2009) y floraciones de algas nocivas en sistemas acuáticos adyacentes (Anderson *et al.* 2002). Varios invasores oportunistas de humedales, por ejemplo, la *Typha*, estimulan su crecimiento por el enriquecimiento de nutrientes (Woo y Zedler 2002; Lawrence *et al.* 2016); por lo tanto, el uso de herbicidas podría perpetuar un ciclo de retroalimentación positiva que mantiene el estado invadido al crear condiciones ricas en nutrientes que fomenta la re-invasión.

Variables

Turbidez, conductividad, saturación de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y nitrógeno amoniacal (NH_4^+), concentración fosforo total (TP) y nitrógeno total kjedahl (TKN).

Unidades de medición

Unidades de cada variable fisicoquímica (% , y mg/L).

Protocolos de medición

Para las variables de fosforo y nitrógeno se recomiendan las metodologías utilizadas por la EPA (O'Dell 1993a; O'Dell 1993b). Las muestras deben recogerse en botellas de plástico o vidrio. Todas las botellas deben limpiarse a fondo y enjuagarse con agua destilada. El volumen recolectado debe ser suficiente para asegurar una muestra representativa, permitir la replicación del análisis (si es necesario) y minimizar la eliminación de desechos. Las muestras deben conservarse con H_2SO_4 a $\text{pH} < 2$ y enfriarse a 4°C en el momento de la recolección. Las muestras deben analizarse tan pronto como sea posible después de la recolección. Si se requiere almacenamiento, las muestras conservadas se mantienen a 4°C y pueden mantenerse hasta por 28 días.

Para las mediciones del resto de variables consideradas para la evaluación de la calidad de aguas superficiales se utilizará la metodología descrita en la última edición de los “métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales”, según decreto No. 25018-MEIC, publicado en el Diario Oficial La Gaceta No. 59 del 25 de marzo de 1996.

Rangos de variación

Calificación	Estado
Turbidez (UNT)	
Muy bueno	<25
Bueno	
Regular/moderado	
Malo/pobre	
Conductividad ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	
Muy bueno	250
Bueno	250-750
Regular/moderado	750
Malo/pobre	>750
Saturación de oxígeno	
Muy bueno	91-100
Bueno	71-90 y 111-120
Regular/moderado	31-70 y 121 – 130
Malo/pobre	≤ 30 y > 130
Demanda bioquímica de oxígeno	
Muy bueno	≤ 3
Bueno	3,1 a 6,0

Regular/moderado	6,1 a 15
Malo/pobre	>15
Nitrógeno amoniacal	
Muy bueno	<0,5
Bueno	0,50 a 1,0
Regular/moderado	1,1 a 5,0
Malo/pobre	>5,0
Concentración fosforo total ($\mu\text{g L}^{-1}$)	
Muy bueno	< 10
Bueno	11 a 15
Regular/moderado	15 a 20
Malo/pobre	> 20
Concentración de nitrógeno total Kjeldahl ($\mu\text{g L}^{-1}$)	
Muy bueno	5
Bueno	10
Regular/moderado	10-20
Malo/pobre	>20

Rangos sugeridos por MINAE (2007), Richardson *et al.* (2007) y Pérez-Castillo y Rodríguez (2008).

Referencias Bibliográficas

- Abbasi, SA. 2002. Water quality indices. . University of Roorkee, India. INCOH Secretariat, National Institute of Hydrology. 73 p.
- Anderson, DM; Glibert, PM; Burkholder, JM. 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*. 25(4):704-726.
- Brenes, GC. 2013. Nueva metodología para valorar la calidad de las aguas superficiales para su uso como clase 2 en Costa Rica. *Tecnología en marcha*. 26(2):9-19.
- Conley, DJ; Paerl, HW; Howarth, RW; Boesch, DF; Seitzinger, SP; Havens, KE; Lancelot, C; Likens, GE. 2009. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*. 323(5917):1014-1015.
- Davis, MA; Grime, JP; Thompson, K. 2000. Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. *Journal of ecology*. 88(3):528-534.
- Freeland, J; Ciotir, C; Kirk, H. 2013. Regional differences in the abundance of native, introduced, and hybrid *Typha* spp. in northeastern North America influence wetland invasions. *Biological invasions*. 15(12):2651-2665.
- Lawrence, BA; Lishawa, SC; Rodriguez, Y; Tuchman, NC. 2016. Herbicide management of invasive cattail (*Typha x glauca*) increases porewater nutrient concentrations. *Wetlands ecology and management*. 24(4):457-467.

- Martin, MR; Tipping, PW; Reddy, K; Daroub, SH; Roberts, KM. 2010. Interactions of biological and herbicidal management of *Melaleuca quinquenervia* with fire: consequences for ecosystem services. *Biological control*. 54(3):307-315.
- MINAE. 2007. Decreto 33903 Reglamento para la clasificación y la evaluación de la calidad de cuerpos de agua superficiales. *Diario Oficial La Gaceta* 129.
- Mitsch, WJ; Gosselink, JG. 2015. *Wetlands*. 5th ed. Hoboken, New Jersey, Wiley. 747 p. Disponible en <http://booksupport.wiley.com>
- O'Dell, J. 1993a. Method 365.1: Determination of phosphorus by semi-automated colorimetry. Rev. 2.0. *Methods for determination of inorganic substances in environmental samples*.-
- O'Dell, J. 1993b. Determination of total Kjeldahl nitrogen by semi-automated colorimetry. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- Pérez-Castillo, AG; Rodríguez, A. 2008. Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. *Revista de Biología Tropical*. 56(4):1905-1918.
- Richardson, CJ; King, RS; Qian, SS; Vaithyanathan, P; Qualls, RG; Stow, CA. 2007. Estimating ecological thresholds for phosphorus in the Everglades. *Environmental science & technology*. 41(23):8084-8091.
- Schindler, DW; Hecky, R; Findlay, D; Stainton, M; Parker, B; Paterson, M; Beaty, K; Lyng, M; Kasian, S. 2008. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 105(32):11254-11258.
- Woo, I; Zedler, JB. 2002. Can nutrients alone shift a sedge meadow towards dominance by the invasive *Typha glauca*? *Wetlands*. 22(3):509-521.
- Zedler, JB; Kercher, S. 2004. Causes and consequences of invasive plants in wetlands: opportunities, opportunists, and outcomes. *critical Reviews in Plant sciences*. 23(5):431-452.

Indicador: Cambios en la superficie del uso de suelo. **Categoría:** Contexto paisajístico.

Atributo Ecológico Clave: Cobertura y uso de suelo.

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas palustres del PNPV.

Objetivo

Mantener la representatividad del humedal evaluando los cambios de uso de suelo circundante.

Descripción y justificación del indicador

La intensidad de la actividad humana en el paisaje tiene un impacto proporcional en los procesos ecológicos de los ecosistemas naturales. La evaluación del uso de la tierra incorpora tanto el aspecto de la "destrucción del hábitat" como la "modificación del hábitat" (McIntyre y Hobbs 1999). Es decir, además del efecto de convertir el hábitat natural en modificaciones agrícolas, urbanas y otras modificaciones del uso del suelo, existe el aspecto adicional de la intensidad de uso. Los usos humanos del suelo menudo alteran directa o indirectamente muchos procesos ecológicos naturales.

El interés en el análisis de la cobertura de suelo ha adquirido una atención creciente desde finales de la década de 1990 (Cihlar *et al.* 2000). Comprender y cuantificar los procesos de cambio de uso de suelo es necesario para garantizar una gestión sostenible de los recursos naturales (Turner 1987). El análisis y la caracterización del uso de suelo y el cambio en la cobertura se están volviendo necesarios para comprender y predecir los procesos de cambio de la cobertura terrestre.

El cambio de uso de suelo alrededor del PNPV compromete la calidad de agua de los humedales por la descarga de nutrientes y modificaciones en la conectividad funcional de los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres. Esta métrica se basará en la propuesta por Faber-Langendoen *et al.* (2012b) que lleva los valores de uso de suelo a índices en función al peso de cada uso de suelo propuesto.

Variable

Índice de uso de suelo.

Unidades de medición

Índice de 0 a 10.

Protocolo de medición

Esta métrica documenta los usos del suelo circundante dentro del área de interés y está basada en los protocolos estandarizados de Rocchio *et al.* (2016) para la evaluación en humedales. Para ello, datos de campo y herramienta de teledetección como fotografías aéreas o imágenes satelitales, se utilizan para identificar un porcentaje preciso de cada uso de suelo dentro de la matriz de paisaje.

Para calcular un puntaje total de uso de suelo, se calcula el porcentaje de cada tipo de uso de suelo el cual es multiplicado por un coeficiente (un peso ponderado) especificado en el cuadro 6, según la siguiente ecuación:

$$Puntaje_{uso_suelo} = \sum \left(CP \times \frac{PA}{100} \right)$$

Donde, CP = coeficiente ponderado para el tipo de uso de suelo

PA= % de área adyacente en el tipo de uso de suelo

Por ejemplo, si el 30% del área del paisaje está dominado por especies invasoras ($0.3 \times 5 = 1.5$), 10% compuesto de caminos no pavimentados ($0.1 \times 1 = 0.1$) y 60% era un área natural (p. Ej., Sin uso humano) ($0.6 \times 10 = 6.0$), el puntaje de uso total del suelo del paisaje principal =7.6 ($1.5+0.1+6.0$).

Cuadro 6. Tipos de uso de suelo dentro del PNPV

Categorías de uso de suelo	Coeficiente ponderado
Caminos	1
Agropecuario	3
Tierras dominadas por especies invasoras	5
Área Natural, Bosques (inundado, primario, secundario, Xerofito)	10

Rangos de variación

Calificación	Criterio de calificación
Muy bueno	Puntaje de uso de suelo= 9.5-10
Bueno	Puntaje de uso de suelo= 8.0-9.4
Regular/moderado	Puntaje de uso de suelo= 4.0-7.9
Malo/pobre	Puntaje de uso de suelo < 4.0

Rangos sugeridos por Collins *et al.* (2006) y Faber-Langendoen *et al.* (2012a)

Referencias Bibliográficas

Cihlar, J; Latifovic, R; Chen, J; Beaubien, J; Li, Z. 2000. Selecting representative high resolution sample images for land cover studies. Part 1: Methodology. *Remote Sensing of Environment*. 71(1):26-42.

Collins, JN; Stein, ED; Sutula, M; Clark, R; Fetscher, AE; Grenier, L; Grosso, C; Wiskind, A. 2006. California Rapid Assessment Method (CRAM) for Wetlands and Riparian Areas. 136 p. (Version 4.2.3).

Faber-Langendoen, D; Hedge, C; Kost, M; Thomas, S; Smart, L; Smyth, R; Drake, J; Menard, S. 2012a. Assessment of Wetland Ecosystem Condition across Landscape Regions: A

Multi-metric Approach Part A. Ecological Integrity Assessment Overview and Field Study in Michigan and Indiana.

Faber-Langendoen, D; Rocchio, J; Thomas, S; Kost, M; Hedge, C; Nichols, B; Walz, K; Kittel, G; Menard, S; Drake, J; Muldavin, E. 2012b. Assessment of Wetland Ecosystem Condition across Landscape Regions: A Multi-metric Approach Part B. Ecological Integrity Assessment Protocols for Rapid Field Methods (L2).

McIntyre, S; Hobbs, R. 1999. A framework for conceptualizing human effects on landscapes and its relevance to management and research models. *Conservation biology*. 13(6):1282-1292.

Rocchio, FJ; Crawford, RC; Ramm-Granberg, T. 2016. Field Manual for Applying Rapid Ecological Integrity Assessments in Wetlands and Riparian Areas in Washington State.

Turner, MG. 1987. Spatial simulation of landscape changes in Georgia: a comparison of 3 transition models. *Landscape Ecology*. 1(1):29-36.

Indicador: Patrones hidrológicos

Categoría: Contexto paisajístico.

Atributo Ecológico Clave: Régimen hidrológico.

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas palustres del PNPV; Ecosistemas riberos de la CBRT; ecosistemas estuarinos del PNPV.

Objetivo

Monitorear los flujos de entrada y salida de una manera cualitativa en los humedales verificando su importancia en la persistencia y estacionalidad de estos.

Descripción y justificación del indicador

Uno de los factores y quizás el más importante en el estudio de los humedales, es el agua. La composición biológica de un humedal depende de la forma de movimiento del agua dentro del mismo, es decir, de los procesos de entrada, movimiento y salida del agua a través del sistema (Solís 1991) que, junto con los procesos de erosión y sedimentación, a largo plazo, controlan la forma, tamaño, profundidad y localización del humedal, además de la presencia y/o ausencia de especies (Solís 1991). Conocer los aspectos hídricos predominantes en el sistema como: la fuente de agua: marinas, subterráneas, ríos, precipitaciones; la forma de salida del agua: evapotranspiración, escurrimiento superficial o descarga subterránea; la profundidad del agua; y la velocidad del agua; es fundamental en el estudio de la hidrología del sistema.

La hidrología es un factor ecológico complicado de medir durante una evaluación rápida y el personal verá que las métricas están relacionadas entre ellas al momento de ser medidas. Una forma simple de retratar el enfoque principal de cada métrica es la siguiente, propuesta por Collins *et al.* (2006) y modificadas por Faber-Langendoen *et al.* (2012) y Rocchio *et al.* (2016):

- Fuente de agua: agua que entra al humedal.
- Hidroperíodo: patrones de agua dentro del humedal, independientemente de la fuente.
- Conectividad: intercambio de agua entre los humedales y los sistemas circundantes, independientemente de los patrones dentro del humedal.

Fuente de agua

Es una evaluación de las entradas directas de agua al humedal. Estas entradas abarcan las formas o lugares de las entradas de agua al humedal, así también como cualquier desviación del agua no natural del humedal. Las desviaciones se consideran un impacto para las fuentes de agua natural porque tienen un impacto directo a la hidrología del humedal.

Hidroperíodo

Es una evaluación de la frecuencia y duración de la inundación o saturación de un humedal durante un año típico. El hidroperíodo integra los flujos de entrada y salida de agua y varía según el tipo de humedal principal. Para los humedales de marea, hay muchos ciclos del hidroperíodo que corresponden a diferentes periodicidades en las relaciones orbitales entre la tierra, la luna y

el sol, creando una variedad de patrones de marea en marcos de tiempo semi diarios, diarios, semi-semanales, mensuales, estacionales y anuales. Para los humedales no mareales con hidroperíodos fluctuantes, como humedales depresivos, lacustres, ribereños y planos minerales, los ciclos se rigen por patrones estacionales o anuales de lluvia y temperatura. Las lagunas pueden ser episódicamente sujetas a la inundación de las mareas, pero de lo contrario pueden tener hidroperíodo similares a los sistemas lacustres (Collins *et al.* 2006; Faber-Langendoen *et al.* 2012).

Conectividad hidrológica

Es la evaluación de la capacidad del agua de entrar, salir y/o poder inundar áreas adyacentes.

Variable

Cualitativas.

Unidades de medición

Descripción.

Protocolo de medición

Fuente de agua

Esta métrica puede ser evaluada inicialmente desde imágenes satelitales o imágenes aéreas y revisadas con vistas a campo. La métrica se enfoca en las fuentes directas de marea o de agua dulce, según el tipo de humedal, comparada con las fuentes naturales o no naturales listadas en el cuadro 7.

Cuadro 7. Lista de fuentes de agua

Inundación	Flujo de superficie natural	Irrigación por filtración
Acuífero aluvial	Precipitación	Escorrentía urbana /alcantarillas
Descarga de aguas subterráneas	Irrigación de aplicación directa	Otro:

Hidroperíodo para ecosistemas palustres

Esta métrica evalúa los cambios recientes en el hidroperíodo y el grado en que estos cambios afectan la estructura y composición de la comunidad de plantas de humedales (Collins *et al.* 2006). Se requiere una comprensión básica de la hidrología natural o la dinámica del canal del tipo de humedal que se evalúa para aplicar esta métrica.

La evaluación del hidroperíodo para todos los humedales tipo palustres debe iniciarse con una revisión en la oficina de las desviaciones o aumentos de los caudales o la alteración de las condiciones de saturación del humedal. Los indicadores de campo se enumeran en el cuadro 8 y se deben usar para ayudar en la asignación de la calificación. Los indicadores de campo para

el hidroperíodo alterado incluyen bombas, cajas de muelles, zanjas, mangueras y tuberías, invasión de la vegetación terrestre, vegetación excesiva a lo largo del perímetro del humedal.

Cuadro 8. Indicadores de campo de hidroperíodo (adaptado de Collins *et al.* (2006))

Condición	Indicadores de campo de hidroperíodo
Reducción de extensión y duración de inundación o saturación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cajas de manantiales aguas arriba, desvíos, embalses, bombas, zanjas o desagües del humedal. ▪ Evidencia de mortalidad de vida silvestre acuática. ▪ Invasión de vegetación terrestre. ▪ Estrés o mortalidad de plantas hidrófitas.
Mayor extensión y duración de la inundación o la saturación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bermas, diques u otras características de control del agua que aumentan la duración del llenado del humedal. ▪ Desviación, abandono o drenaje en el humedal. ▪ Vitalidad de temporada tardía de la vegetación anual. ▪ Vegetación ribereña o terrestre recientemente ahogada. ▪ Grandes depósitos de grano fino en los márgenes de los humedales.

Conectividad hidrológica

La puntuación de esta métrica se basa únicamente en observaciones de campo. No se requiere trabajo de oficina. La métrica se evalúa en el campo al observar signos de alteración del movimiento horizontal del agua dentro del área de evaluación.

Rangos de variación

Fuente de agua

Calificación	Fuente de agua variante: Ecosistema Palustre y Fluvial
Muy bueno	La fuente de agua es natural: la hidrología del sitio está dominada por la precipitación, el agua subterránea, la escorrentía natural de un cuerpo de agua dulce adyacente. No hay indicación de fuentes directas de agua artificial. El uso del suelo en el área de drenaje local del sitio es principalmente de espacio abierto o baja densidad (usos pasivos). Carece de descargas puntuales en o adyacentes al sitio.
Bueno	La fuente de agua es principalmente natural, pero el sitio recibe directamente cantidades pequeñas u ocasionales de fuentes antropogénicas. Las indicaciones de aportes antropogénicos incluyen tierra desarrollada o tierras agrícolas

	(<20%) en el área de drenaje inmediato al sitio, pequeños desagües pluviales u otras descargas locales que se vacían en el sitio, o alguna escorrentía de carreteras. No hay fuentes puntuales grandes que se descarguen en el sitio o adyacentes al mismo.
Regular/moderado	La fuente de agua se ve moderadamente afectada por fuentes antropogénicas, pero todavía son una mezcla de fuentes naturales y no naturales. Las indicaciones de la contribución moderada de fuentes antropogénicas incluyen tierras desarrolladas o irrigación para agricultura que comprende el 20-60% de la cuenca de drenaje inmediata o muchos desagües pluviales pequeños o unos pocos grandes.
Malo/pobre	La fuente de agua se ve afectada sustancialmente por fuentes antropogénicas (por ejemplo, escorrentía urbana, irrigación directa, agua bombeada, agua artificialmente incautada u otra hidrología artificial). Las indicaciones de hidrología artificial sustancial incluyen > 60% de tierra desarrollada o agrícola adyacente al sitio, y la presencia de fuentes puntuales importantes que se descargan en el sitio o adyacentes al mismo.

Rangos sugeridos por Collins *et al.* (2006) y ajustados por Rocchio *et al.* (2016)

Calificación	Fuente de agua variante: Ecosistema Estuarino
Muy bueno	Las fuentes de agua mareal y no mareal son naturales sin alteraciones artificiales a la salinidad natural; no hay indicación de fuentes directas de agua artificial. Carece de descargas puntuales en o adyacentes al humedal.
Bueno	Las fuentes de agua mareal y no mareal son en su mayoría naturales, con pequeñas alteraciones a la salinidad natural. El sitio recibe directamente cantidades pequeñas o continuas de entradas de fuentes antropogénicas; los indicadores incluyen <20% del paisaje central es tierra agrícola o desarrollada, escorrentía de carreteras, desagües pluviales u otras descargas menores que desembocan en el humedal.
Regular/moderado	Las fuentes de agua mareal y no mareal son moderadamente impactadas por la actividad humana; los indicadores de entradas antropogénicas incluyen 20-60% de tierra desarrollada o agrícola adyacente al sitio, incluyendo irrigación directa o agua bombeada, cantidades moderadas de escorrentía vial, desagües pluviales de tamaño moderado y/o descargas moderadas de fuentes puntuales en o adyacentes al humedal.
Malo/pobre	Las fuentes de agua mareal y no mareal se ven sustancialmente afectadas por la actividad humana. Los indicadores de entrada antropogénica incluyen > 60% de tierra desarrollada o agrícola adyacente al sitio, grandes cantidades de desagües pluviales de gran tamaño y descargas de fuentes puntuales principales hacia el humedal o en sus proximidades.

Rangos sugeridos por Collins *et al.* (2006) y ajustados por Rocchio *et al.* (2016)

Hidroperíodo

Calificación	Hidroperíodo variante: Ecosistema Palustre
Muy bueno	El hidroperíodo se caracteriza por patrones naturales de llenado, inundación, saturación y secado o extracción. No existen factores estresantes hidrológicos importantes que afecten el hidroperíodo natural. (cuadro 8)
Bueno	Los patrones de llenado o inundación del período hidrológico se desvían ligeramente de las condiciones naturales debido a la presencia de factores estresantes tales como: zanjas pequeñas o desvíos; bermas o caminos en o cerca del sitio; baja compactación por el ganado; o pequeñas adiciones de flujo.
Regular/moderado	Los patrones de llenado o inundación y secado del hidroperíodo se desvían moderadamente de las condiciones naturales debido a la presencia de factores estresantes tales como: zanjas o desvíos de 30 a 90 cm de profundidad; caminos de dos carriles; alcantarillas adecuadas para el flujo de la corriente base, pero no para el flujo de inundación; compactación moderada por el ganado que podría canalizar o desviar agua. Modificación moderada de los patrones naturales asociados con la inundación: extracción, saturación y descarga de filtración.
Malo/pobre	El llenado o inundación del hidroperíodo se desvían sustancialmente de las condiciones naturales debido a alteraciones de alta intensidad, tales como: una carretera de 4 carriles; diques grandes que incautan agua; desviaciones mayores a 90 cm de profundidad que retiran una porción significativa de flujo; grandes cantidades de relleno; bombeo significativo de aguas subterráneas artificiales; o adiciones de flujo pesado. El hidroperíodo es dramáticamente diferente de natural. Las desviaciones aguas arriba estresan severamente al humedal. Los humedales ribereños pueden secarse durante tiempos críticos. Alteración significativa de los patrones naturales asociados con la inundación: extracción, saturación y descarga de infiltración.

Rangos sugeridos por Collins *et al.* (2006) y ajustados por Rocchio *et al.* (2016)

Conectividad hidrológica

Calificación	Conectividad hidrológica variante: Ecosistema Palustre
Muy bueno	No hay obstrucciones no naturales en el movimiento lateral o vertical de las aguas superficiales. El aumento de agua en el sitio tiene acceso sin restricción a tierras altas adyacentes, sin diques, bancos excesivamente altos, barreras artificiales u otras obstrucciones al movimiento lateral de los flujos de inundación.
Bueno	Restricciones menores al movimiento lateral o vertical de las aguas subterráneas o superficiales por características no naturales, como diques o bancos excesivamente altos. Menos del 25% del sitio está restringido por barreras al drenaje. Las restricciones pueden ser intermitentes a lo largo del sitio, o las restricciones pueden ocurrir solo a lo largo de una orilla. Los flujos de inundación pueden exceder las obstrucciones, pero el drenaje hacia el humedal está incompleto debido al embalse.
Regular/moderado	Restricciones moderadas al movimiento lateral o vertical de las aguas subterráneas o superficiales por características no naturales,

	como diques o bancos excesivamente altos. Entre el 25 y el 75% del sitio está restringido por barreras al drenaje. Los flujos de inundación pueden exceder las obstrucciones, pero el drenaje hacia el humedal está incompleto debido al embalse.
Malo/pobre	Esencialmente no hay conexión hidrológica a humedales adyacentes o tierras altas. La mayoría o todas las etapas de agua están contenidas dentro de bancos artificiales, diques o características comparables. Más del 75% del humedal está restringido por barreras al drenaje.

Rangos sugeridos por Collins *et al.* (2006) y ajustados por Rocchio *et al.* (2016)

Referencias Bibliográficas

- Collins, JN; Stein, ED; Sutula, M; Clark, R; Fetscher, AE; Grenier, L; Grosso, C; Wiskind, A. 2006. California Rapid Assessment Method (CRAM) for Wetlands and Riparian Areas. 136 p. (Version 4.2.3).
- Faber-Langendoen, D; Hedge, C; Kost, M; Thomas, S; Smart, L; Smyth, R; Drake, J; Menard, S. 2012. Assessment of Wetland Ecosystem Condition across Landscape Regions: A Multi-metric Approach Part A. Ecological Integrity Assessment Overview and Field Study in Michigan and Indiana.
- Rocchio, FJ; Crawford, RC; Ramm-Granberg, T. 2016. Field Manual for Applying Rapid Ecological Integrity Assessments in Wetlands and Riparian Areas in Washington State.

Indicador: Cambios en la superficie de la cobertura de bosque de manglar. **Categoría:** Tamaño.

Atributo Ecológico Clave: Bosque de Mangle.

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas estuarinos del PNPV.

Objetivo

Controlar los cambios en la superficie de los bosques de manglar causada por fenómenos naturales y/o humanos como medición para una alerta temprana.

Descripción y justificación del indicador

A pesar del alto valor que tienen los ecosistemas de manglar por los servicios de protección costera, hábitats de pesca y para vida silvestre, filtradores de sedimentos y contaminación, y actuando como sumideros de nutrientes y carbono (Mumby *et al.* 2004; Spalding *et al.* 2010; Bouillon 2011; Ellison 2015; Mitsch y Gosselink 2015), las áreas de manglar se han ido reduciendo aceleradamente en los últimos años (Giri *et al.* 2011). En países con información anual, se calcula una pérdida del 35% de los manglares por cambios extensivos del uso del suelo (EEM 2005), es poco probable que los cambios que se experimentan sean reversibles en la mayoría de ellos.

Mantener la representatividad del ecosistema en el paisaje es importante para continuar recibiendo la variedad de servicios ecosistémicos que son brindados y que aún son escasamente conocidos, tanto los relacionados con carbono como los que no (Kolka *et al.* 2016) y de asegurar la protección de aquellas relaciones y procesos que ocurren dentro de este ecosistema.

Los bosques de mangle están ubicados en las franjas marginales, están compuestos por especies de los géneros *Rhizophora* y *Avicennia*, asociadas a otro tipo de vegetación como epífitas, lianas, musgos y líquenes entre otros. Abarcan una superficie de 833 ha (SINAC 2017), condicionada al flujo de los niveles de salinidad del agua y el suelo producto del efecto intermareal. La presión por parte del sector agrícola compromete la persistencia de este tipo de ecosistemas. Las comunidades cercanas al manglar practican la pesca artesanal y la extracción de varias especies de moluscos y crustáceos de valor comercial. La pesca artesanal es una actividad económica importante y la sobreexplotación amenaza la biodiversidad (SINAC 2013).

Variable

Superficie total de Bosque de manglar.

Unidades de medición

Hectáreas (ha).

Protocolo de medición

El protocolo utiliza una evaluación visual de la cobertura absoluta del bosque de mangle. La metodología en campo propuesta es un método semi-cuantitativo a través de sobrevuelos con

vehículos no tripulados (drone) que registra el tamaño de la cobertura del bosque de mangle analizando las imágenes obtenidas del vuelo sobre cada humedal.

El procesamiento de la información será a través de plataformas informáticas como ArcGis o QGis para trabajar las imágenes y realizar el cálculo de las métricas necesarias.

Rangos de variación

Calificación	Tamaño de bosque
Muy bueno	
Bueno	
Regular/moderado	
Malo/pobre	

Referencias Bibliográficas

- Bouillon, S. 2011. Storage beneath mangroves. *Nat Geosci.* 4:282–283.
- Ellison, JC. 2015. Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts. *Wetlands ecology and management.* 23(2):115-137.
- Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EEM). 2005. Los Ecosistemas y El Bienestar Humano: Humedales y Agua, Informe de Síntesis. Washington, DC., World Resources Institute. 80 p. Disponible en http://www.millenniumassessment.org/documents/MA_WetlandsandWater_Spanish.pdf
- Giri, C; Ochieng, E; Tieszen, LL; Zhu, Z; Singh, A; Loveland, T; Masek, J; Duke, N. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography.* 20(1):154-159.
- Kolka, R; Murdiyarso, D; Kauffman, J; Birdsey, R. 2016. Tropical wetlands, climate, and land-use change: adaptation and mitigation opportunities. *Wetlands ecology and management.* 24(2):107-112. doi 10.1007/s11273-016-9487-x
- Mitsch, WJ; Gosselink, JG. 2015. *Wetlands.* 5th ed. Hoboken, New Jersey, Wiley. 747 p. Disponible en <http://booksupport.wiley.com>
- Mumby, PJ; Edwards, AJ; Arias-González, JE; Lindeman, KC; Blackwell, PG; Gall, A; Gorczynska, MI; Harborne, AR; Pescod, CL; Renken, H. 2004. Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature.* 427(6974):533-536.
- Proyecto humedales SINAC-PNUD-GEF. 2017. Valoración de los servicios ecosistémicos que ofrecen siete de los humedales protegidos de importancia internacional en Costa Rica: Palo Verde, Caribe Noreste, Caño Negro, Gandoca-Manzanillo, Mequenque, Térraba-Sierpe y Las Baulas. . Ed. SINCA/CINPE-UNA/PNUD. 144 p.
- SINAC. 2013. Plan General de Manejo del Parque Nacional Palo Verde. Volumen I - Diagnóstico. Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT). Guanacaste, Costa Rica 209 p.
- Spalding, M; Kainuma, M; Collins, L. 2010. *World atlas of mangroves.* A collaborative project of ITTO, ISME, FAO, UNEP-WCMC. UNESCO-MAB, UNU-INWEH and TNC. Earthscan, London.

Indicador: Calidad de condiciones ambientales

Categoría: Condición.

Atributo Ecológico Clave: Química del suelo y agua.

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas estuarino del PNPV.

Objetivo

Detectar los cambios del incremento del nivel del mar en los ecosistemas estuarinos a mediano y largo plazo.

Descripción y justificación del indicador

Los manglares además de enfrentar amenazas como la deforestación, expansión de la frontera agrícola y acuicultura (EEM 2005) son también amenazados por el cambio climático, especialmente el incremento del nivel del mar (INM) (Ellison 2015). En el quinto informe de evaluación el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) se proyectan incrementos sustanciales del nivel del mar entre 0.26 a 0.98 m, para el 2100 dependiendo los escenarios de trayectorias de concentración representativa (RCP) (IPCC 2013). Aunque los manglares en cuencas son menos vulnerables al INM (Sasmito *et al.* 2016) es elemental monitorear el efecto sobre estos ecosistemas para estudios posteriores de evaluación de resiliencia, por ejemplo.

Una forma de medición del INM puede ser la medición de la salinidad, que se constituye como un factor perjudicial para muchas especies por lo que se considera un factor que influye en la composición de las especies. Este factor actúa como un estrés para las plantas provocando un decrecimiento en las tasas de crecimiento (Pezeshki *et al.* 1987a; Pezeshki *et al.* 1987b; McKee y Mendelsohn 1989). Así también, reduce la diversidad de especies tanto de plantas como de macroinvertebrados (Waterkeyn *et al.* 2008; Keddy 2010) repercutiendo sobre taxones más altos en la cadena trófica.

La oscilación estacional de la salinidad en los manglares está en función de la altura y duración de las mareas, la estacionalidad e intensidad de las lluvias y la estacionalidad y cantidad de agua dulce que ingresa a los humedales de manglares a través de ríos, riachuelos y esorrentías. Se debe considerar que la salinidad es generalmente más alta durante la estación seca (Mitsch y Gosselink 2015).

Variable

Salinidad.

Unidades de medición

Partes por millón (ppm).

Protocolo de medición

Las mediciones del nivel de salinidad serán realizadas por medio de equipos portátiles multiparámetros que registran los valores de salinidad para suelo y agua en cada ecosistema de interés de manera que sean representativas del sector.

Se recomienda diseñar un muestreo estratificado, con puntos de muestreo establecidos de manera aleatoria con al menos 3 muestras por sitio.

Rangos de variación

Calificación	Salinidad (ppm)
Muy bueno	10000-20000
Bueno	
Regular/moderado	
Malo/pobre	

Rangos extraídos de Cintrón (1985)

Referencias Bibliográficas

Cintrón, G. 1985. Structural and functional properties of mangrove forests. The botany and natural history of Panama.:53-66.

Ellison, JC. 2015. Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts. *Wetlands ecology and management*. 23(2):115-137.

Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EEM). 2005. Los Ecosistemas y El Bienestar Humano: Humedales y Agua, Informe de Síntesis. Washington, DC., World Resources Institute. 80 p. Disponible en http://www.millenniumassessment.org/documents/MA_WetlandsandWater_Spanish.pdf

IPCC. 2013. Resumen para responsables de políticas. *In* Stocker, TF; D. Qin; Plattner, G-K; M.Tignor; Allen, SK; Boschung, J; Nauels, A; Xia, Y; Bex, V; Midgley, PM (eds.). Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América., Cambridge University Press. p.

Keddy, P. 2010. Other factors. *In* Wetland Ecology: Principles and Conservation. Cambridge, Reino Unido, Cambridge in press. p. 213-233.

McKee, KL; Mendelssohn, IA. 1989. Response of a freshwater marsh plant community to increased salinity and increased water level. *Aquatic Botany*. 34(4):301-316.

Mitsch, WJ; Gosselink, JG. 2015. Wetlands. 5th ed. Hoboken, New Jersey, Wiley. 747 p. Disponible en <http://booksupport.wiley.com>

- Pezeshki, S; DeLaune, R; Patrick, W. 1987a. Response of baldcypress (*Taxodium distichum* L. var. *distichum*) to increases in flooding salinity in Louisiana's Mississippi River Deltaic Plain. *Wetlands*. 7(1):1-10.
- Pezeshki, S; DeLaune, R; Patrick, W. 1987b. Response of the freshwater marsh species, *Panicum hemitomon* Schult., to increased salinity. *Freshwater Biology*. 17(2):195-200.
- Sasmito, SD; Murdiyarso, D; Friess, DA; Kurnianto, S. 2016. Can mangroves keep pace with contemporary sea level rise? A global data review. *Wetlands ecology and management*. 24(2):263-278.
- Waterkeyn, A; Grillas, P; Vanschoenwinkel, B; Brendonck, L. 2008. Invertebrate community patterns in Mediterranean temporary wetlands along hydroperiod and salinity gradients. *Freshwater Biology*. 53(9):1808-1822.

Indicadores de tercer nivel. Potenciales para implementación

Indicador: Composición de fauna silvestre. **Categoría:** Condición.

Atributo Ecológico Clave: Diversidad de vida silvestre.

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas palustres del PNPV; ecosistemas estuarinos del PNPV.

Objetivo

Monitoreo del cambio en la composición de especies de macroinvertebrados y vertebrados que pueden ser atribuibles a cambios ambientales y/o perturbaciones antrópicas.

Descripción y justificación del indicador

Los humedales del Parque Nacional Palo Verde albergan una alta biodiversidad: 1731 especies de artrópodos (49%), 937 de plantas (27%), 328 de hongos (10%), 314 de aves (9%), 99 de mamíferos (3%), 59 de reptiles (2%), 19 de peces (0.5%), y 15 de anfibios (0.5%). De la diversidad costarricense, en el PNPV está representado el 6% de los artrópodos, el 8% de las plantas, el 13% de los hongos, el 35% de las aves, el 41% de los mamíferos, el 26% de los reptiles, el 14% de los peces y el 9% de los anfibios (López *et al.* 2012; SINAC 2016).

Los anfibios y mamíferos son grupos taxonómicos sensibles y por sobre todo relativamente simples de identificar. Sin embargo, su presencia es muy variable y se ve afectada por características migratorias (Croonquist y Brooks 1991). A pesar de que los mamíferos no son usados a menudo como indicadores por rasgos comportamentales y por su propia ecología difícil de seguir (Schneider 2010), es posible valorar algunas especies como indicadores por su alta dependencia a hábitats particulares y/o por variaciones en presencia/ausencia incluso abundancia entre áreas diferentes. Aunque no son indicadores frecuentes en el uso, no significa que no puedan ser utilizados, la presencia de poblaciones saludables podría indicar la ausencia de factores adversos en el ecosistema (Schneider 2010).

Por su parte, los macroinvertebrados son los organismos más utilizados como bioindicadores acuáticos debido al buen conocimiento de su historia vida y ecología (Johnson *et al.* 1993; Innis *et al.* 2000). Los invertebrados suelen estar muy adaptados a un entorno particular, haciéndolos susceptibles a factores estresantes como la falta de oxígeno o la alta salinidad (Keddy 2010). La abundancia y la composición de éstos se han utilizado de forma variable para desarrollar índices bióticos específicos de cada país.

Variable

Riqueza (S), curva de acumulación de especies e índices de diversidad (Shannon e inverso de Simpson).

Unidades de medición

Índices de diversidad taxonómica.

Protocolo de medición

Las metodologías utilizadas dependerán del grupo taxonómico, las metodologías recomendadas son muestreos estandarizados para captura de macroinvertebrados establecidos en la normativa de Costa Rica (Decreto 33903), cámaras trampa para el caso de mamíferos, y búsqueda intensiva para el caso de la herpetofauna, cumpliendo con metodologías que aseguren abarcar la mayor variabilidad posible de condiciones tanto ambientales como espaciales.

Rangos de variación

Calificación	Diversidad
Muy bueno	
Bueno	
Regular/moderado	
Malo/pobre	

Referencias Bibliográficas

Croonquist, MJ; Brooks, RP. 1991. Use of avian and mammalian guilds as indicators of cumulative impacts in riparian-wetland areas. *Environmental Management*. 15(5):701-714.

Innis, SA; Naiman, RJ; Elliott, SR. 2000. Indicators and assessment methods for measuring the ecological integrity of semi-aquatic terrestrial environments. *Hydrobiologia*. 422:111-131.

Johnson, RK; Wiederholm, T; Rosenberg, DM. 1993. Freshwater biomonitoring using individual organisms, populations, and species assemblages of benthic macroinvertebrates. *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*.40-158.

Keddy, PA. 2010. *Wetland ecology: principles and conservation*. Cambridge University Press. 497 p.

López, I; Gutiérrez, D; Alvarado, C. 2012. Diagnóstico Biológico Eco-Región Cuenca Baja del Tempisque. Guanacaste, Costa Rica.

Schneider, M. 2010. *Freshwater Mammals as Indicators of Habitat Condition*. Springer. 33-44 p.

SINAC. 2016. Plan Específico de Manejo de Recursos Naturales del Parque Nacional Palo Verde 2016-2017. Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT). Guanacaste, Costa Rica, 44 p.

Indicador: Composición y estructura de la vegetación

Categoría: Condición

Atributo Ecológico Clave: Diversidad de vida silvestre

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas palustres del PNPV

Objetivo

Evaluar la composición y la estructura de la vegetación en los humedales para la detección de cambios y tendencias atribuibles a perturbaciones humanas y al cambio climático.

Descripción y justificación del indicador

La integridad de los ecosistemas llega a su óptimo cuando la composición de sus especies originales domina la comunidad vegetal brindando un hábitat adecuado para múltiples especies de animales (Comer *et al.* 2017). La composición de la vegetación refleja las interacciones entre las plantas y los procesos físicos, especialmente la hidrología.

Los métodos de integridad ecológica y biológica consideran que la vegetación es capaz de expresar sintéticamente el rango y el grado de estrés que enfrenta el humedal durante muchos años (Faber-Langendoen *et al.* 2012a).

Esta métrica evalúa el grado de degradación de las especies de plantas, incluida la disminución de la diversidad de especies y la pérdida de especies claves o indicadoras, así como el dominio cambiante causado por la respuesta positiva a los factores estresantes. Cada tipo de humedal tiene un rango específico de especies que se espera dominen bajo condiciones de referencia o mínimamente perturbadas. Sin embargo, cuando la perturbación (a menudo inducida por el hombre) excede el rango natural de variación, solo aquellas plantas con amplia tolerancia a la alteración sobrevivirán. Las especies “conservadoras” (aquellas con alta fidelidad a la integridad del hábitat) disminuirán o desaparecerán en relación con el grado de perturbación (Wilhelm y Masters 1995).

Por otro lado, la estructura de la vegetación puede controlar, a cierto nivel, la composición y los procesos que ocurren en el sistema de humedal. La estructura es un reflejo importante de los procesos dinámicos del ecosistema, incluido el régimen hidrológico, la regeneración y el ciclo de nutrientes. Una estructura más compleja permite muchos nichos de hábitat a pequeña escala para especies silvestres y vegetales. La diversidad ecológica de un sitio a menudo se correlaciona con la complejidad de los parches abióticos y bióticos. El aumento de la complejidad conduce a un aumento de los nichos de hábitat y puede mejorar los procesos ecológicos (Collins *et al.* 2006; Faber-Langendoen *et al.* 2012b; Rocchio *et al.* 2016; Comer *et al.* 2017).

Variable

Composición, riqueza y estructura de especies de plantas.

Unidades de medición

especies, abundancias relativas, dominancia y estructura.

Protocolos de medición

El protocolo sugerido es el adaptado por Collins *et al.* (2006) y Faber-Langendoen *et al.* (2012b) que proponen recorrer el humedal, observar la abundancia y diversidad de especies nativas y seleccionar el mejor sitio que describa la composición original o menos perturbada. La finalidad es buscar las especies representativas del humedal y las especies que pueden prosperar a medida que alguna perturbación, natural o antrópica, incremente también.

El protocolo para la toma de datos sobre la estructura consiste en evaluar tanto la estructura horizontal como vertical de la vegetación en relación con la condición de referencia de la heterogeneidad estructural de las formas de crecimiento dominantes. Los datos de campo utilizados para estimar la estructura pueden consistir en 1) datos cualitativos donde los observadores recorren el humedal y toman notas sobre la estructura de la vegetación, o 2) datos cuantitativos, donde se examina un área fija utilizando parcelas o transectos.

Rangos de variación

Calificación	Composición
Muy bueno	La composición de especies de plantas nativas (abundancia y diversidad de especies) no es perturbada o esta mínimamente perturbada cumpliendo con todas las características: i) Rango típico de especies características de cada humedal presentes. ii) especies nativas sensibles a la degradación antropogénica presentes iii) Especies nativas indicadoras de perturbaciones antropogénicas ausentes o con poca cobertura.
Bueno	La composición de especies de plantas nativas presenta alteraciones menores con al menos una característica: i) Algunas especies nativas ausentes o sustancialmente reducidas en abundancia. ii) Al menos algunas especies nativas sensibles a la degradación antropogénica están presentes. iii) Especies nativas indicadoras de perturbaciones antropogénicas están presentes con poca cobertura.
Regular/moderado	La composición de especies de plantas nativas presenta moderada alteración, cumpliendo alguna de las siguientes características:

	<p>i) Muchas especies nativas ausentes o sustancialmente reducidas en abundancia.</p> <p>ii) No hay especies nativas sensibles a la degradación antropogénica.</p> <p>iii) Las especies nativas indicadoras de perturbaciones antropogénicas están presentes con una cobertura moderada.</p>
Malo/pobre	<p>La composición de especies de plantas nativas muestra condiciones severamente alteradas:</p> <p>i) La mayoría o todas las especies nativas están ausentes, algunas pueden permanecer en muy baja abundancia</p> <p>ii) Las especies nativas indicadoras de perturbaciones antropogénicas están presentes con alta cobertura.</p>

Referencias Bibliográficas

- Collins, JN; Stein, ED; Sutula, M; Clark, R; Fetscher, AE; Grenier, L; Grosso, C; Wiskind, A. 2006. California Rapid Assessment Method (CRAM) for Wetlands and Riparian Areas. 136 p. (Version 4.2.3).
- Comer, PJ; Faber-Langendoen, D; Menard, S; O'Connor, R; Higman, P; Lee, YM; Klatt, B. 2017. User Guide for Wetland Assessment and Monitoring in Natural Resource Damage Assessment and Restoration. NatureServe (ed.). Arlington VA. 107 p.
- Faber-Langendoen, D; Hedge, C; Kost, M; Thomas, S; Smart, L; Smyth, R; Drake, J; Menard, S. 2012a. Assessment of Wetland Ecosystem Condition across Landscape Regions: A Multi-metric Approach Part A. Ecological Integrity Assessment Overview and Field Study in Michigan and Indiana.
- Faber-Langendoen, D; Rocchio, J; Thomas, S; Kost, M; Hedge, C; Nichols, B; Walz, K; Kittel, G; Menard, S; Drake, J; Muldavin, E. 2012b. Assessment of Wetland Ecosystem Condition across Landscape Regions: A Multi-metric Approach Part B. Ecological Integrity Assessment Protocols for Rapid Field Methods (L2).
- Rocchio, FJ; Crawford, RC; Ramm-Granberg, T. 2016. Field Manual for Applying Rapid Ecological Integrity Assessments in Wetlands and Riparian Areas in Washington State.
- Wilhelm, GS; Masters, L. 1995. Floristic quality assessment in the Chicago region and application computer programs. Morton Arboretum, Lisle, IL.

Indicador: Calidad de las condiciones ambientales

Categoría: Condición

Atributo Ecológico Clave: Química del suelo y agua

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas riberos de la CBRT

Objetivo

Monitoreo de la calidad de los cuerpos de agua superficiales.

Descripción y justificación del indicador

Los macroinvertebrados son los organismos más utilizados como bioindicadores acuáticos debido al buen conocimiento de su historia vida y ecología (Johnson *et al.* 1993; Innis *et al.* 2000). Los invertebrados suelen estar muy adaptados a un entorno particular, haciéndolos susceptibles a factores estresantes como la falta de oxígeno o la alta salinidad (Keddy 2010). La abundancia y la composición de éstos se han utilizado de forma variable para desarrollar índices bióticos específicos de cada país.

Los macroinvertebrados bentónicos muestran importantes ventajas en su uso como indicadores a nivel global, por ser de ocurrencia generalizada, tener alta diversidad, movilidad limitada, tiempo de generación prolongada y facilidad de muestreo (Resh 2008).

Costa Rica tiene reglamentado los criterios y metodologías para la evaluación de la calidad de los cuerpos de agua superficiales utilizando como indicadores biológicos a los macroinvertebrados bentónicos (MINAE 2007).

Variable

Índice biológico BMWP-CR.

Unidades de medición

Índice adimensional.

Protocolo de medición

Los métodos para la toma de muestras y para los análisis de aguas serán los especificados en el reglamento N° 33903-MINAE-S que está basado en la última edición de los “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”.

Rangos de variación

Calificación	Composición
Muy bueno	>120
Bueno	101-120
Regular/moderado	36-100
Malo/pobre	<35

Rangos ajustados del reglamento 33903-MINAE-S

Referencias Bibliográficas

- Innis, SA; Naiman, RJ; Elliott, SR. 2000. Indicators and assessment methods for measuring the ecological integrity of semi-aquatic terrestrial environments. *Hydrobiologia*. 422:111-131.
- Johnson, RK; Wiederholm, T; Rosenberg, DM. 1993. Freshwater biomonitoring using individual organisms, populations, and species assemblages of benthic macroinvertebrates. *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*.40-158.
- Keddy, PA. 2010. *Wetland ecology: principles and conservation*. Cambridge University Press. 497 p.
- MINAE. 2007. Decreto 33903 Reglamento para la clasificación y la evaluación de la calidad de cuerpos de agua superficiales. *Diario Oficial La Gaceta*129.
- Resh, VH. 2008. Which group is best? Attributes of different biological assemblages used in freshwater biomonitoring programs. *Environmental monitoring and assessment*. 138(1-3):131-138.

Indicador: Patrones hidrológicos

Categoría: Contexto paisajístico

Atributo Ecológico Clave: Régimen hidrológico

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas riberosos de la CBRT

Objetivo

Monitorear los cambios para una alerta temprana de los niveles de descarga del río como regulador de la hidrodinámica del humedal.

Descripción y justificación del indicador

Como una problemática global, la extracción de agua de los cuerpos de río para agricultura, industria, uso doméstico y el cambio climático ha provocado una reducción del flujo de los ríos. (Meybeck 2003; Hoekstra y Mekonnen 2012). Estudios han demostrado como el cambio de la hidrología de la cuenca y la descarga de los ríos afecta la entrada de salinidad, navegabilidad, transporte de sedimentos y ecología (Ganju *et al.* 2004; van Rijn 2011; Winterwerp y Wang 2013; Winterwerp *et al.* 2013; Kaplan y Muñoz-Carpena 2014). De manera general Alfonso (2016) menciona que existe una relación inversa entre la magnitud de la descarga del río y la atenuación de la marea, por tanto, el río actúa como una barrera natural que minimiza la exposición del humedal a eventos de inundación frecuentes.

Las características anuales de inundación que muestran los humedales del Parque Nacional Palo Verde son susceptibles a cambios mínimos en los niveles del río debido a una relación no lineal con el flujo anual del río que fue encontrado en los resultados de Alfonso (2016). Arias y Calvo-Alvarado (2012) sugieren que el mecanismo natural de protección contra inundaciones debido a la mayor descarga del río ha sido alterado. A pesar de que el desbordamiento del río es una característica que define la hidrología del humedal, el incremento en la frecuencia y magnitud han redefinido el hidropériodo local. La disminución en la descarga de río provocada indirectamente por construcciones destinadas a la extracción de agua, han provocado un aumento en la magnitud de las inundaciones en el área de estudio (Alfonso 2016).

Variable

Caudal de río.

Unidades de medición

$M^3 \cdot s^{-1}$.

Protocolos de medición

Las mediciones son realizadas por medio de la instalación de estaciones climáticas instaladas en diferentes partes aguas arriba y debajo de los ríos que aseguren una cobertura del sitio.

Rangos de variación

Calificación	Composición
Muy bueno	
Bueno	
Regular/moderado	
Malo/pobre	

Referencias Bibliográficas

- Alfonso, A. 2016. Novel quantification of long-term hydrological and landscape spatiotemporal dynamics of coupled natural human systems: the case study of the Tempisque-Palo Verde National Park coastal wetland, Costa Rica. Tesis Doctorado. Gainesville, Fla, University of Florida. 205 p.
- Arias, IG; Calvo-Alvarado, JC. 2012. Water resources of the Upper Tempisque river watershed, Costa Rica. *Tecnología en marcha*. 25:63-70.
- Ganju, NK; Schoellhamer, DH; Warner, JC; Barad, MF; Schladow, SG. 2004. Tidal oscillation of sediment between a river and a bay: a conceptual model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 60(1):81-90.
- Hoekstra, A; Mekonnen, M. 2012. The water footprint of humanity, *P. Natl. Acad. Sci.*, 109, 3232–3237.
- Kaplan, DA; Muñoz-Carpena, R. 2014. Groundwater salinity in a floodplain forest impacted by saltwater intrusion. *Journal of contaminant hydrology*. 169:19-36.
- Meybeck, M. 2003. Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 358(1440):1935-1955.
- van Rijn, LC. 2011. Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; part I: tidal wave propagation in convergent estuaries. *Ocean Dynamics*. 61(11):1719-1741.
- Winterwerp, JC; Wang, ZB. 2013. Man-induced regime shifts in small estuaries—I: theory. *Ocean Dynamics*. 63(11-12):1279-1292.
- Winterwerp, JC; Wang, ZB; van Braeckel, A; van Holland, G; Kösters, F. 2013. Man-induced regime shifts in small estuaries—II: a comparison of rivers. *Ocean Dynamics*. 63(11-12):1293-1306.

Indicador: Composición de aves

Categoría: Condición

Atributo Ecológico Clave: Diversidad de vida silvestre

Elemento Focal de Manejo: Ecosistemas estuarinos del PNPV

Objetivo

Mantener y asegurar la diversidad de aves residentes y migratorias en los diferentes humedales estuarinos del PNPV.

Descripción y justificación del indicador

Varios aspectos de la ecología de las aves acuáticas los hacen útiles como bioindicadores. Se ha demostrado que las aves acuáticas rastrean las variaciones ambientales a escalas temporales cortas (meses) y largas (años), tanto a nivel de especie como de comunidad (por ejemplo, (Nudds 1983; Abraham y Sydeman 2004; Almaraz y Amat 2004; Rendón *et al.* 2008). De igual forma, debido a que muchas especies son depredadores superiores y varios contaminantes a menudo se acumulan a lo largo de la cadena trófica, este grupo puede usarse como indicadores de cambios que ocurren a niveles tróficos más bajos (por ejemplo, (Matsinos y Wolff 2003; Burger y Eichhorst 2005).

La riqueza, composición de las especies de aves y la diversidad en general pueden, por lo tanto, actuar principalmente como un indicador de la alteración del uso del suelo, la fragmentación del hábitat y otras influencias humanas (Amat y Green 2010). Aunque las aves acuáticas pueden identificarse fácilmente, tienen un alto valor social y un historial de vida bien conocido, son muy móviles y muchas veces se ven más afectadas por las características del hábitat (por ejemplo, superficie del agua, vegetación) y la estación que por la calidad del agua (Van den Broeck *et al.* 2015)

Los humedales del PNPV se constituyen como los más importantes del país debido a la importancia que ejercen en la alimentación y descanso de cerca de 60 especies aves acuáticas y migratorias (Slud 1964; Slud 1980; Sánchez *et al.* 1985; Hurtado 2003; Villareal Orias 2006; Umaña 2007), característica ecológica que llevo a la declaración como sitio Ramsar (RAMSAR 1998) y al reconocimiento de área importante para la conservación de las aves en Costa Rica (Sandoval y Sánchez 2011).

Variable

Riqueza (S), curva de acumulación de especies e índices de diversidad (Shannon e inverso de Simpson)

Unidades de medición

Número (#) de especies y valor de índice de Shannon (H) e índice inverso de Simpson (S_{inv}).

Protocolos de medición

Las observaciones de aves serán realizadas con el método de puntos de conteo y transectos lineales de muestreo, metodologías ya estandarizadas dentro del PNPV y llevadas a cabo según el protocolo de muestreo generado por el programa de investigación del Parque (Isaac 2013).

La periodicidad es fijada a cuatro meses en el año (diciembre, enero, febrero y marzo) periodo clave por las condiciones ambientales (inicio de época seca) y por la visita de aves migratorias. Los recorridos y puntos de conteo serán programados según el cronograma de monitoreo.

Rangos de variación

Calificación	Diversidad de especies
Muy bueno	
Bueno	
Regular/moderado	
Malo/pobre	

Referencias Bibliográficas

- Abraham, CL; Sydeman, WJ. 2004. Ocean climate, euphausiids and auklet nesting: inter-annual trends and variation in phenology, diet and growth of a planktivorous seabird, *Ptychoramphus aleuticus*. *Marine Ecology Progress Series*. 274:235-250.
- Almaraz, P; Amat, JA. 2004. Multi-annual spatial and numeric dynamics of the white-headed duck *Oxyura leucocephala* in southern Europe: seasonality, density dependence and climatic variability. *Journal of Animal Ecology*. 73(6):1013-1023.
- Amat, JA; Green, AJ. 2010. Waterbirds as bioindicators of environmental conditions. Springer. 45-52 p.
- Burger, J; Eichhorst, B. 2005. Heavy metals and selenium in grebe eggs from Agassiz National Wildlife Refuge in northern Minnesota. *Environmental monitoring and assessment*. 107(1-3):285-295.
- Hurtado, J. 2003. Abundancia, diversidad, riqueza uso de habitat y comportamiento e aves acuáticas: Una comparación entre un humedal seminatural y un arrozal con riesgo en Costa Rica. Tesis Maestría. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional.
- Isaac, LN. 2013. Protocolo de monitoreo de aves en humedales. San Jose, Costa Rica SINAC-ACT. 9 p.
- Matsinos, YG; Wolff, W. 2003. An individual-oriented model for ecological risk assessment of wading birds. *Ecological modelling*. 170(2-3):471-478.
- Nudds, TD. 1983. Niche dynamics and organization of waterfowl guilds in variable environments. *Ecology*. 64(2):319-330.

- RAMSAR. 1998. Sitio Ramsar Parque Nacional Palo Verde Costa Rica. Gland, Suiza, RAMSAR. 36 p.
- Rendón, MA; Green, AJ; Aguilera, E; Almaraz, P. 2008. Status, distribution and long-term changes in the waterbird community wintering in Doñana, south-west Spain. *Biological Conservation*. 141(5):1371-1388.
- Sánchez, J; Rodríguez, JM; Salas, C. 1985. Distribución, ciclos reproductivos y aspectos ecológicos de aves acuáticas. *In* Ministerio de Agricultura y Ganadería; Dirección Forestal; Subdirección de Vida Silvestre (eds.). *Investigaciones sobre fauna silvestre de Costa Rica*. San José, Costa Rica, Universidad Estatal a Distancia. p. 83-102.
- Sandoval, L; Sánchez, C. 2011. Áreas Importantes para la Conservación de las Aves de Costa Rica. San José, Costa Rica, Unión de Ornitólogos de Costa Rica. 196 p.
- Slud, P. 1964. The birds of Costa Rica, distribution and ecology. *Bulletin of the American Museum of Natural History*. 128:
- Slud, P. 1980. The birds of Hacienda Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica. *Smithsonian Contributions to Zoology*. 292:
- Umaña, E. 2007. Fluctuaciones temporales en la diversidad y abundancia relativa de aves acuáticas en el Refugio Natural de Vida Silvestre Laguna Mata Redonda y Humedal Corral de Piedra, Costa Rica. Tesis Licenciatura. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional.
- Van den Broeck, M; Waterkeyn, A; Rhazi, L; Grillas, P; Brendonck, L. 2015. Assessing the ecological integrity of endorheic wetlands, with focus on Mediterranean temporary ponds. *Ecological Indicators*. 54:1-11.
- Villareal Orias, J. 2006. Aves acuáticas del Refugio de Vida Silvestre Laguna Mata Redonda, Costa Rica *Zeledonia*. 10:13-34.

Anexo 3. Rutina en R y resultados del análisis de ARIMA para datos de estaciones meteorológicas para la determinación de umbrales de variación aceptable para 10 años de datos mensuales

```
#Generar la serie de tiempo de resolución mensual
Name.serie<-ts(data, start = c(inicio,lag), frequency = 12)
#Análisis ARIMA
Name.ana<-auto.arima(data)
#Gráficas
par(mfrow=c(2,3))
plot(data)
acf(data)
pacf(data)
acf(name.ana$residuals)
pacf(name.ana$residuals)
plot(name.ana$residuals)
#Probar ajuste del modelo
tsdiag(name.ana)
```

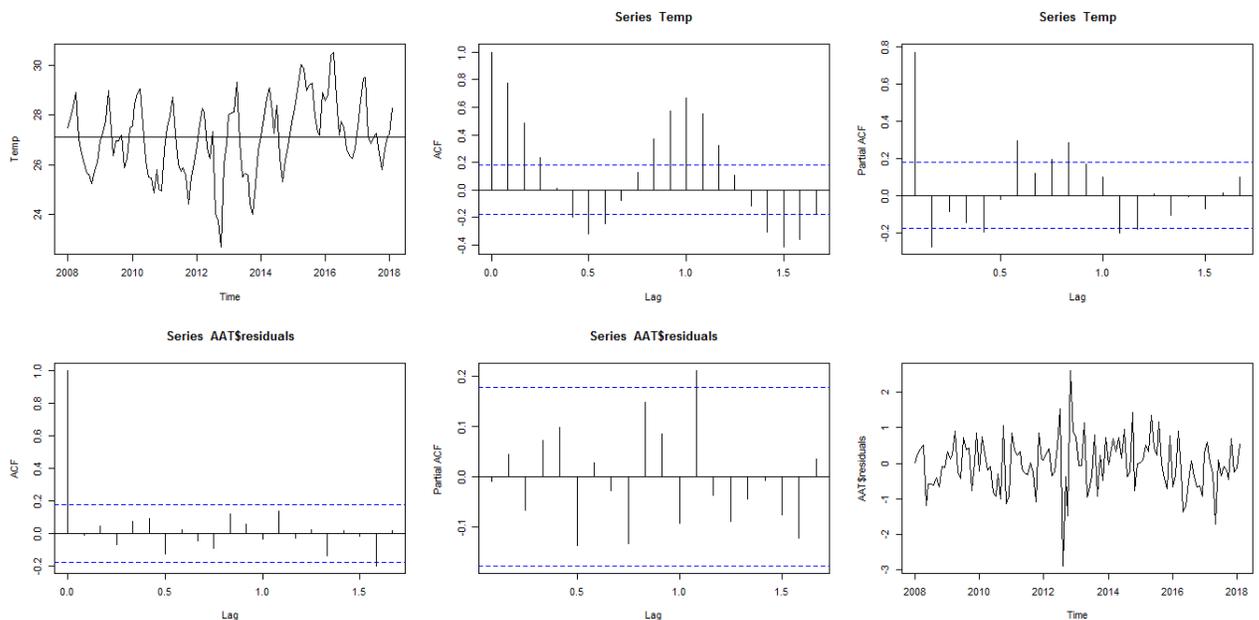


Figura 7. Gráficos de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (Parcial ACF) con la serie de tiempo y los residuos del modelo ARIMA con datos de temperatura, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

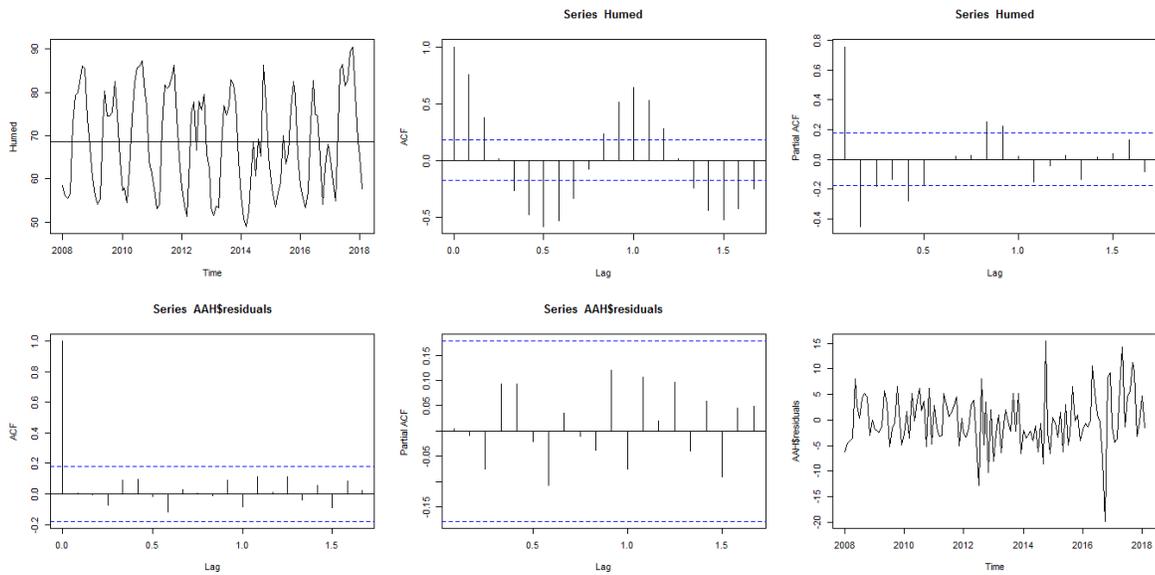


Figura 8. Gráficos de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (Parcial ACF) con la serie de tiempo y los residuos del modelo ARIMA con datos de humedad relativa, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

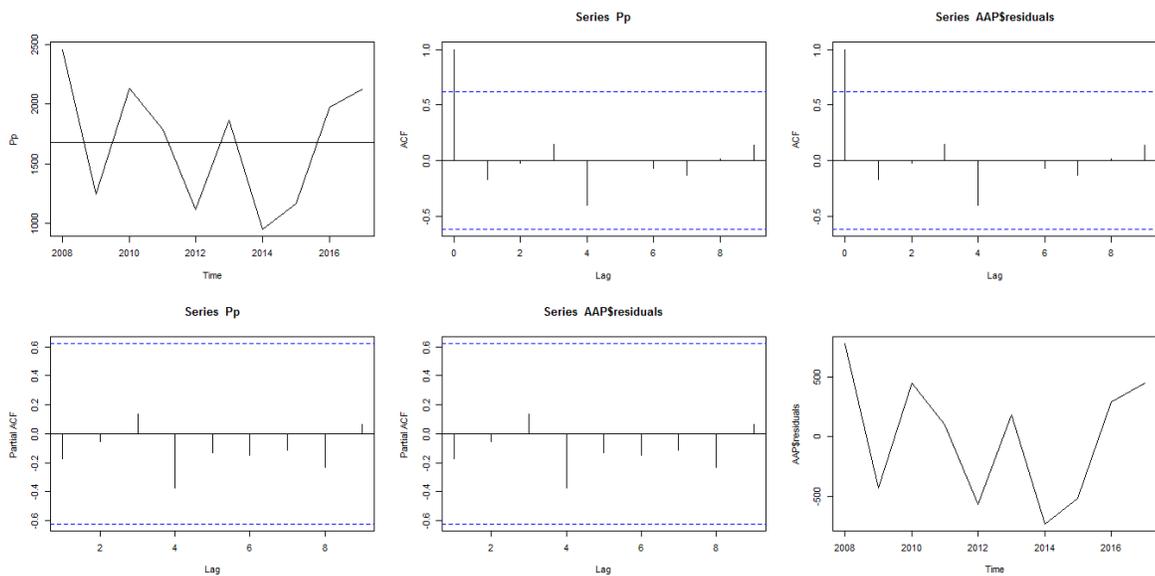


Figura 9. Gráficos de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (Parcial ACF) con la serie de tiempo y los residuos del modelo ARIMA con datos de precipitación anual, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica

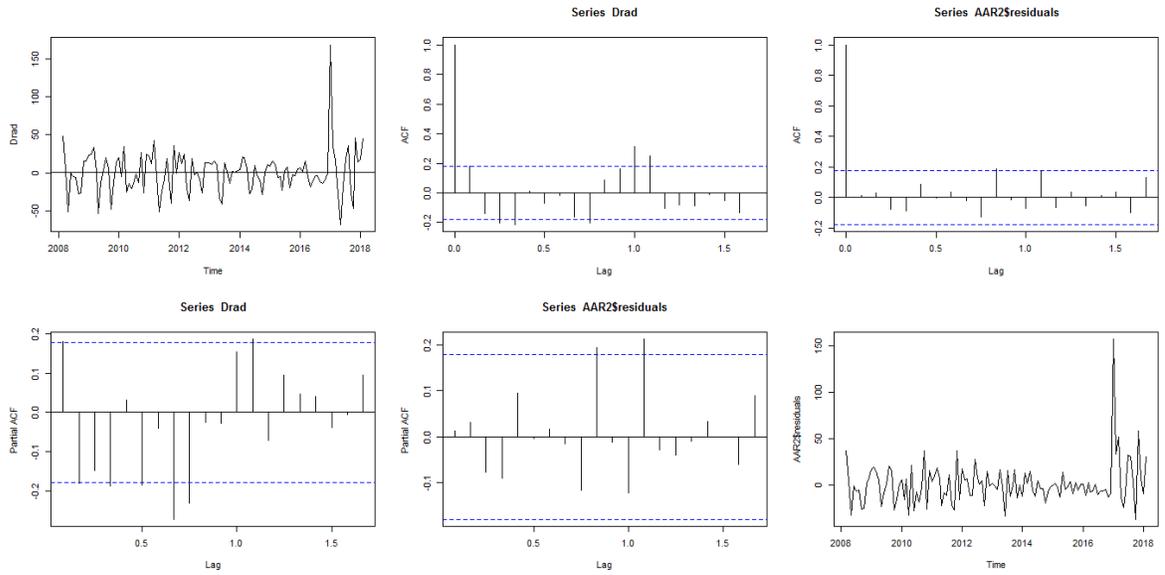


Figura 10. Gráficos de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (Parcial ACF) con la serie de tiempo y los residuos del modelo ARIMA con datos diferenciados de radiación solar, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica