

UNIVERSIDAD NACIONAL, COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
POSGRADO EN ECOTOXICOLOGÍA TROPICAL

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES AGRONÓMICAS EN EL
MODELO PWC, PARA LA PARAMETRIZACIÓN DE UN ESCENARIO DE CULTIVO
DE PIÑA, COSTA RICA

SUSTENTANTE

JEANNETTE VENEGAS ALVARADO

CAMPUS OMAR DENGO

HEREDIA, COSTA RICA

2023

Tesis sometida a consideración del Tribunal Examinador del Posgrado en Ecotoxicología Tropical, para optar al grado de Magister Scientiae en Ecotoxicología Tropical, con énfasis en Vida Silvestre.

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES AGRONÓMICAS EN EL
MODELO PWC, PARA LA PARAMETRIZACIÓN DE UN ESCENARIO DE CULTIVO
DE PIÑA, COSTA RICA

Sustentante

Jeannette Venegas Alvarado

Tesis presentada para optar al grado de Magister Scientiae en Ecotoxicología Tropical con
énfasis en Vida Silvestre. Cumple con los requisitos establecidos por el Sistema de
Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

Dr. José Vega Baudrit
Representante del Consejo Central de Posgrado

Dra. Kinndle Blanco Peña
Coordinadora del posgrado

MSc. Silvia Echeverría Sáenz
Tutora de tesis

MSc. Inti Acedo Vásquez
Miembro del Comité Asesor

Dr. Fernando Ramírez Muñoz
Miembro del Comité Asesor

Jeannette Venegas Alvarado
Sustentante

Resumen

El proceso actual de registro de plaguicidas en Costa Rica se fundamenta principalmente en evaluaciones de riesgo, que utilizan modelos matemáticos de predicción basados en datos que no son propios del país. Organismos reguladores del medio ambiente han indicado que es necesario generar datos propios de la región, así como invertir recursos en el estudio y la capacitación sobre estos modelos para realizar evaluaciones de manera integrada y con datos que representen mejor la realidad de los cultivos en el país. El Modelo “Pesticides Water Calculator” (PWC) es una herramienta que permite estimar la concentración de plaguicidas en aguas superficiales y subterráneas después de su uso en cultivos. Este modelo considera diferentes parámetros climáticos, agronómicos, características de la topografía y la hidrología del sitio. Estos parámetros pueden tener un impacto significativo en la precisión de las predicciones de concentraciones de plaguicidas en agua, realizadas por el modelo PWC. El objetivo del presente estudio fue evaluar la influencia de las variables agronómicas en el modelo PWC, para la parametrización de un escenario con mayor representatividad de las condiciones locales, para el cultivo de piña en Costa Rica. El análisis de sensibilidad se realizó simulando aplicaciones de hexazinona (persistente y móvil en el suelo y medio acuático) y diazinon (moderada solubilidad, baja lixiviación y persistencia) en una piñera en la Zona Norte (ZN) del país. La sensibilidad de las variables agronómicas de interés en la modelización del PWC, se evaluó mediante el método de Morris. Los datos de los parámetros esenciales de fenología del cultivo, características fisicoquímicas de las moléculas, características de clima, suelo y uso agronómico, necesarios para construir un escenario local específico se obtuvieron de la literatura, bases de datos oficiales y consultas a trabajadores de piñeras. De acuerdo con los resultados de esta investigación, los parámetros agronómicos que se identificaron como sensibles en las modelaciones en el cultivo de piña fueron (i) cobertura de dosel, (ii) altura de dosel, profundidad de raíces de la planta de la piña y (iii) fecha de maduración de la piña. Al recopilar todos los datos propios de cultivo de piña se propone por primera vez un posible escenario para cultivo de piña en la ZN del país, el cual incluye un 60.8% de parametrización de los datos. Esta investigación representa un avance importante para promover el uso de herramientas como el modelo matemático PWC. Además, es un avance hacia la parametrización de escenarios de exposición del PWC con

datos locales de las diferentes zonas y cultivos de Costa Rica, la cual permitió identificar las principales limitaciones y retos que representa la parametrización de escenarios.

Palabras clave: Análisis de sensibilidad de Morris, variables ambientales, variables agronómicas, cultivo de piña, PWC, PEC, parametrización de escenarios, modelos de exposición.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mi comité asesor, por haber sido una ayuda y guía durante todo el proceso de esta investigación y por su constante apoyo durante todo el proceso de esta investigación. Su dedicación, compromiso y experiencia fueron fundamentales en la elaboración de este trabajo.

Agradezco especialmente a mi jefa y asesora MSc. Inti Acedo Vásquez, por su contante disponibilidad y motivación cuando los plazos se acercaban y mi estrés aumentaba. Siempre estuvo ahí para ayudarme a mantener la calma y recordarme la importancia del proceso y del resultado final. Más que una asesora, se convirtió en una guía, con quien siempre pude contar para obtener una retroalimentación honesta y constructiva.

También quisiera agradecer a mi familia y amigos, quienes me brindaron su paciencia, apoyo e inagotables palabras de aliento y motivación para finalizar con esta etapa y continuar con nuevos capítulos tanto personales como profesionales. Agradezco especialmente a Fede, Kari y José Andrés, quienes me escucharon, fueron mi fuente de desahogo y vivieron este proyecto a mi lado siempre impulsándome a seguir.

Asimismo, quiero agradecer todos los que de alguna manera me colaboraron con conocimiento o fuentes de investigación, especialmente al profesor Alejandro Vargas Martínez, quien fue una ayuda fundamental en mis análisis y resultados.

También quiero agradecer al Comité de Gestión Académica (CGA) de la Maestría en Ecotoxicología Tropical por haberme brindado la oportunidad de presentar mi tesis de maestría y al Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET-UNA), gracias a la calidad de la educación que recibí, pude acceder a nuevas oportunidades y avanzar en mi carrera de una manera que nunca habría imaginado. Espero que sigan brindando la misma calidad de educación y apoyo a los estudiantes que vienen después de mí.

Gracias de todo corazón por su colaboración y apoyo.

Dedicatoria

Queridos papá y mamá,

No hay suficientes palabras para expresar cuánto agradezco su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. No podría haber llegado hasta aquí sin ustedes y su dedicación a mi formación personal y profesional.

Esta tesis es el resultado de años de arduo trabajo, dedicación y perseverancia y es un testimonio de la confianza y el aliento que siempre me han brindado. Ustedes han sido mi roca en los momentos difíciles y mi fuente de inspiración en los buenos momentos.

Mamá, tu inagotable paciencia y tu capacidad para siempre escucharme y encontrar las palabras adecuadas para levantarme y permitirme continuar me han llevado a superarme a mí misma. Papá, tu ejemplo y apoyo incondicional han sido mi guía en este viaje académico y personal. Me has enseñado a tomar decisiones con convicción, a no dudar de mis capacidades y a nunca darme por vencida.

Este logro es tanto mío como de ustedes. Espero que esta tesis les haga sentir orgullosos y les muestre cuánto valoro todo lo que han hecho por mí. Les dedico todos mis logros académicos con todo mi corazón y espero que se sientan felices de saber que siempre estaré agradecido por su amor y apoyo. Los amo con todo mi corazón

Contenido

<i>Resumen</i>	<i>iv</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>vi</i>
<i>Dedicatoria</i>	<i>vii</i>
<i>Contenido</i>	<i>viii</i>
<i>Lista de cuadros</i>	<i>xi</i>
<i>Lista de figuras</i>	<i>xii</i>
<i>Lista de anexos</i>	<i>xiii</i>
<i>Lista de abreviaturas</i>	<i>xiv</i>
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	6
Los plaguicidas como contaminantes de cuerpos de agua.	6
Modelo PWC	10
Modelo de Zona de Origen del Plaguicida (PRZM-5)	11
Modelo de Volumen Variable del Cuerpo de Agua (VVWM)	13
Escenarios de exposición	14
Análisis de Sensibilidad	16
El método de los efectos elementales de Morris	17
Interpretación de un gráfico de Morris	18
La zona Huetar Norte de Costa Rica	19
III. OBJETIVOS	22
1. Objetivo general	22
2. Objetivos específicos	22
IV. METODOLOGÍA	23

1.	Parametrización de los datos	24
1.1.	Selección de la zona geográfica	24
1.2.	Datos ambientales de la Región Huetar Norte	24
1.2.1.	Variables climáticas.	24
1.2.2.	Los datos del suelo	26
1.2.3.	Datos del cuerpo de agua	27
1.3.	Características agronómicas del cultivo de piña a escala local (variables que se emplean en el cálculo de PEC con PWC)	27
1.4.	Selección de plaguicidas para el modelado	28
1.4.1.	Características físicas y químicas y de comportamiento ambiental.	28
1.4.2.	Patrón de uso aprobado para los plaguicidas seleccionados	29
2.	Análisis de sensibilidad mediante el método de efectos elementales de Morris.	29
2.1.	Selección de escenario base para el modelaje en el PWC.	29
2.2.	Diseño de estudio para los análisis de sensibilidad.	30
2.3.	Análisis de sensibilidad en R	31
3.	Descripción de una propuesta de parametrización para un escenario de piña en CR.	31
V.	<i>RESULTADOS</i>	33
1.	Información recopilada de las variables de entrada que se requieren para el modelaje con PWC, para cultivo de piña en la zona norte de Costa Rica.	33
1.1.	Selección del escenario base:	33
1.2.	Características agronómicas del cultivo de piña	34
1.3.	Condiciones climáticas	35
1.4.	Características de suelo	35
1.5.	Selección del plaguicida y patrón de uso	36

2.	Modelajes y cálculos del PEC con el PWC, en un cultivo de piña en la Zona Norte, Costa Rica.	37
3.	Análisis de sensibilidad de las variables agronómicas del modelo PWC	38
4.	Posibles valores de entrada para un escenario de exposición del modelo PWC, con mayor representatividad para un cultivo de piña en la ZNN de Costa Rica.	41
VI.	<i>DISCUSIÓN</i>	42
1.	Información recopilada de las variables de entrada que se requieren para el modelaje con PWC, para cultivo de piña en la zona norte de Costa Rica.	42
2.	Sensibilidad de las variables agronómicas en el cálculo del PEC, con el modelo PWC.	44
3.	Posible escenario de exposición del modelo PWC para un cultivo de piña en la ZNN de Costa Rica.	47
VII.	<i>CONCLUSIONES</i>	50
VIII.	<i>RECOMENDACIONES</i>	52
IX.	<i>REFERENCIAS</i>	54
X.	<i>ANEXOS</i>	68

Lista de cuadros

Cuadro 1. Información requerida y pasos a seguir para el cálculo de PEC y el análisis de sensibilidad de las variables agronómicas del modelo PWC en un cultivo de piña. _____	23
Cuadro 2. Datos de las estaciones meteorológicas de la Región Huetar Norte proporcionados por el Instituto Nacional Meteorológico de Costa Rica. Cuadro tomado de IMN-DIM-CM-284-2022 _____	24
Cuadro 3. Conversión y cálculos de las variables climáticas que requiere el modelo PRZM5. Tomado, traducido y adaptado de Fry et al. (2016) _____	26
Cuadro 4. Datos del patrón de uso aprobado para cada plaguicida en cultivos de piña, empleados en el modelaje con el programa PWC. _____	29
Cuadro 5. Características de comparación entre el cultivo de papa considerado como escenario base y el cultivo de piña. _____	33
Cuadro 6. Valores agronómicos del cultivo de piña en la ZNN, Costa Rica empleados en el cálculo de PEC con PWC y valores agronómicos de los escenarios seleccionados como puntos de comparación inferior y superior seleccionados como punto de comparación para realizar el análisis de sensibilidad de Morris _____	34
Cuadro 7. Características morfológicas y variables físicas de suelos Ultisoles, asociados a cultivos de piña convencional, Sarapiquí, Heredia, obtenidas de Aguirre, (2021). _____	36
Cuadro 8. Valores de las propiedades fisicoquímicas recopiladas para el herbicida hexazinona y el insecticida diazinon, empleados en el modelaje con el programa PWC. _	37
Cuadro 9. Resultados del PEC 24 horas después de la aplicación (ppb), de tres escenarios diferentes con el herbicida hexazinona y el insecticida diazinon para cada escenario, con el modelo PWC. _____	38

Lista de figuras

- Figura 1. Dinámica ambiental de plaguicidas. Tomado de Mac-Loughlin (2021). _____ 8
- Figura 2. Diagrama sobre la interacción de los diferentes interfaces del modelo PW, para calcular la exposición a plaguicidas en cuerpos de agua. Tomado y adaptado de Young 2019. 11
- Figura 3. Diagrama del modelo Pesticide Root Zone Model (PRZM), entradas, salidas y procesos que incluyen en la transformación de una molécula. Tomado de Sinnathamby (2018). 13
- Figura 4. Diagrama de un cuerpo de agua estándar que muestra entradas, salidas y procesos que incluyen en la transformación de una molécula. Tomado de Young 2019. __ 14
- Figura 5. Representación esquemática de la disposición teórica de las medias μ_i^* y las desviaciones estándar σ_i de la distribución de efectos. Tomado de Alfaro-Vives y Mas-Diego, 2022. _____ 19
- Figura 6. Distribución de las regiones dedicadas al cultivo de piña en Costa Rica (Tomado de CANAPEP 2021). _____ 20
- Figura 7. Representación gráfica de los resultados del análisis de sensibilidad de las variables agronómicas del modelo PWC, con el Método Morris para el herbicida hexazinona. 39
- Figura 8. Representación gráfica de los resultados del análisis de sensibilidad de las variables agronómicas del modelo PWC, con el Método Morris para el insecticida diazinon. 40
- Figura 9. Representación gráfica de total de las variables y las categorías de datos que requiere el PWC para realizar el cálculo de la PEC y de las variables modificadas para el cultivo de Piña en la ZN de CR. _____ 41

Lista de anexos

Anexo 1. Categorías y variables de entrada que requiere el modelo PWC para realizar el cálculo de la PEC. _____	68
Anexo 2. Propiedades físicas y químicas de los insecticidas y herbicidas aprobados para su uso en cultivo de Piña (Ananas comosus) en Costa Rica. _____	70
Anexo 3. Script del análisis de sensibilidad de Morris en R _____	74
Anexo 4. Comparación de los 6 escenarios de papa que se incluyen en el programa PWC	75
Anexo 5. Transformación de los datos del clima para generar el archivo de clima con formato. wea para el modelo PWC. _____	76
Anexo 6. Archivo digital con formato “wea” de la estación meteorológica de los Chiles, San Carlos, Costa Rica _____	78
Anexo 7. Reporte de resultados del cálculo de la PEC con el modelo PWC, para el herbicida hexazinona, aplicando los datos de un cultivo de piña en la Zona Norte Norte de Costa Rica	79
Anexo 8. Reporte de resultados del cálculo de la PEC con el modelo PWC, para el insecticida diazinon, aplicando los datos de un cultivo de piña en la Zona Norte Norte de Costa Rica	81
Anexo 9. Carpeta digital con los 426 reportes emitidos por el PWC, como resultado de todas las simulaciones con ambos plaguicidas y en la comparación de los tres escenarios.	84
Anexo 10. Posibles valores de entrada propuestos para un modelaje de exposición en cultivo de piña, con condiciones similares a la región Huetar Norte, utilizando el programa PWC.	85
Anexo 11. Archivo digital del posible escenario para Piña Costa Rica (CR_piña) ____	86
Anexo 12. Cálculo de la tasa máxima de aplicación TMA _____	87
Anexo 13. Cálculo de la fracción de agua para diazinon. _____	88

Lista de abreviaturas

Alt_dos: altura de dosel
C_Henry: constante de Henry
CA: California
CANAPEP: Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña
CGR: Contraloría General de la República.
CIA: Centro de Investigaciones Agronómicas
Co_CA: Coeficiente de carbono orgánico
Cob_dos: cobertura de dosel
COMEX: Ministerio de Comercio Exterior
DIGECA: Dirección de Gestión de Calidad Ambiental.
DT_{50_Ag}: vida media en agua
DT_{50_Fl}: vida media en foliar
DT_{50_Ft}: vida media por fotólisis
DT_{50_Hd}: vida media por hidrólisis
DT_{50_sed}: vida media en sedimentos
DT_{50_sist}: vida media en sistema acuático
DT_{50_Su}: vida media en suelo
EFSA: European Food Safety Authority
ERA: Evaluación de riesgo ambiental
ET₀: evapotranspiración de referencia
EUA: Estados Unidos de América
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FBC: factor de bioacumulación
Fe_Cos: fecha de cosecha
Fe_Mad: fecha de maduración del cultivo
Fe_Sm: fecha de siembra
FL: Florida
FOCUS: Foro para la coordinación de modelos de destino de plaguicidas y su uso

GUS: Puntuación de ubicuidad en las aguas subterráneas (Groundwater Ubiquity Score)

HSDB: Toxnet Hazardous Substances Data Bank

IA: ingrediente activo

INDER: Instituto de Desarrollo Rural

INM: Instituto Nacional Meteorológico

Int_ap: intervalo entre aplicaciones

Koc/Kfoc: Coeficiente de partición materia orgánica y agua

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía

MM: masa molar

N: Nitrógeno

OAT: un parámetro a la vez (one at time)

OC: carbono orgánico

OMS: Organización Mundial de la Salud

P_vapor: presión de vapor

PEC: Concentración ambiental predicha (Predicted environmental concentration)

PMRA: Pest Management Regulatory Agency

PPDB: Pesticide Properties Database

Pr_Rz: profundidad de las raíces

PRZM: Modelo de Zona de Origen del Plaguicida (Pesticide Root Zone Model)

PWC: Calculadora de plaguicidas en agua (Pesticide in Water Calculator)

Ret_ag: Retención de agua del dosel

RHN: Región Huetar Norte

SFE: Servicio Fitosanitario del Estado

Sol_A: solubilidad en agua

TA: tasa de aplicación anual del ingrediente activo

TMA: tasa máxima de aplicación

UE: Unión Europea

USEPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América

VVWM: Modelo de Volumen Variable del Cuerpo de Agua (Variable Volume Water Mode)

X (μ): medidas del efecto medio de la distribución de los parámetros de entrada en la salida del modelo de Morris.

Y (σ): desviaciones estándar de la distribución de los parámetros de entrada en la salida del modelo de Morris

ZNN: Zona Norte Norte

I. INTRODUCCIÓN

El sector agrícola es de gran importancia para la economía de Costa Rica. Durante el año 2022, el Sector Agropecuario contribuyó con un 4,0% del Producto Interno Bruto del país. Mientras que en el 2021 fue el principal exportador de tuvo la posición de piña fresca y jugo de piña a nivel mundial, además de ocupar el tercer lugar como exportador de banano (SEPSA, 2021).

La expansión de las plantaciones ha provocado cambios en el uso del suelo, así como la destrucción de zonas boscosas, desplazando grandes cantidades de terreno de ganadería y agricultura tradicional para convertirlos en monocultivo (Campos, 2020; Obando, 2020). Por ejemplo, los monocultivos de piña y banano utilizan los plaguicidas como principal insumo para aumentar la productividad (Campos, 2020; Obando, 2020

De acuerdo con la Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña (CANAPEP), se estima que actualmente existen cerca de 44 500 ha de terreno nacional dedicadas al cultivo de piña (CANAPEP 2021). La zona Norte del país es una de las regiones de mayor producción de piña, donde se cultivan unas 24 653 ha, lo que representa un 56% de la producción de piña del país (CANAPEP, 2021). La expansión de las zonas de producción piñera conlleva un aumento del uso de plaguicidas y del riesgo de contaminación difusa sobre cuerpos de agua y daños al ambiente (Sánchez, 2019; Campos, 2020).

El aumento del uso de plaguicidas debido a la acelera expansión agrícola y la alta demanda de producción es una problemática preocupante debido a sus efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente (Echeverría-Sáenz et al., 2012; Vryzas et al., 2020). Debido a esta situación, en los últimos años entidades gubernamentales se han preocupado por evaluar y predecir el riesgo de daños ambientales que pueda producir la contaminación con plaguicidas. Estas estimaciones se deben realizar antes de que dichas sustancias se utilicen en campo, es decir, durante el proceso de registro legal del plaguicida en el país (DIGECA, 2019).

En Costa Rica, la Contraloría General de la República (CGR) (CGR, 2004), indicó que el proceso de registro de nuevos plaguicidas debía incluir evaluaciones de riesgo al ambiente,

a la salud y a la agricultura, por lo que, desde el año 2007, se incluye la participación del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), el cual realiza las evaluaciones de riesgo ambiental (ERA) como parte del proceso de registro de plaguicidas (DIGECA, 2019; Decreto Ejecutivo N° 33495-MAG-S-MINAE-MEIC, 2007).

La evaluación de riesgo ambiental (ERA), es una herramienta que permite estimar, mitigar y predecir los posibles daños ambientales por exposición a contaminantes (USEPA, 2022). Se realiza mediante tres pasos: 1) caracterizar la exposición, es decir, una predicción y medición de las posibles rutas de movimiento y concentración de las sustancias en el ambiente; 2) caracterizar el peligro o ecotoxicidad, al determinar la concentración en que los plaguicidas tienen un efecto adverso sobre los organismos; 3) integrar ambos pasos, lo que permite evaluar el riesgo ambiental del contaminante para el ecosistema (USEPA, 2022).

El seguimiento ambiental para realizar la medición real en el ambiente que se requiere para el paso 2 es costoso, demanda un gran esfuerzo de muestreo y los datos que se obtienen son el resultado de eventos que ya sucedieron, por lo que no se pueden utilizar como herramientas preventivas (Kienzler et al., 2016). En caso de que no se dispongan de datos de seguimiento de plaguicidas, es posible emplear modelos matemáticos para pronosticar la trayectoria, el transporte y la exposición de estos en el ambiente (D'Andrea et al., 2020; Casallanovo et al., 2021; De Oliveira y Vieira, 2022).

En la evaluación de riesgos de plaguicidas, es crucial calcular la concentración ambiental predicha (PEC, por sus siglas en inglés) para evaluar adecuadamente los riesgos para el medio ambiente y los organismos no objetivo. Razón por la cual, en América Latina, la medición y estimación de las concentraciones de plaguicidas en el suelo y los cuerpos de agua han ganado la atención de algunos centros de investigación ambiental y de agencias gubernamentales (Gómez-Cruz et al., 2019; Montgomery et al., 2020; Pérez-Brito et al., 2021) No obstante, la generación de datos de monitoreo en países latinos sigue siendo limitada debido principalmente a la falta de recursos, infraestructura y personal capacitado (Carriquiriborde et al., 2014; Casallanovo et al., 2021).

Como alternativa para esta limitante, se han utilizado como una herramienta complementaria para las ERAs, diferentes modelos matemáticos que han desarrollado agencias como la

Agencia de Protección Ambiental (USEPA) de los Estados Unidos (EUA) y el Foro para la Coordinación de Modelos de Destino de Plaguicidas y su Uso (FOCUS) de la Unión Europea (UE). Estos modelos son herramientas que permiten hacer predicciones del destino de los plaguicidas en el ambiente bajo diferentes condiciones ambientales e hidrológicas, brindando una estimación de las concentraciones y el comportamiento de los plaguicidas a lo largo del tiempo y el espacio. Se han diseñado muchos modelos con diferentes objetivos, siendo uno de los más utilizados en evaluaciones de riesgo ambiental, los modelos de exposición. Estos permiten predecir el destino y la concentración de los agroquímicos en un compartimento ambiental. (Holvoet et al., 2007; Rupa-Matysek et al., 2018; D'Andrea, 2019)

Dentro de los modelos de exposición, se han generado programas que permiten medir el riesgo para cada compartimento ambiental en específico (Gali et al., 2020). En el caso de ecosistemas acuáticos, estos modelos de exposición consisten en una simulación de la aplicación de plaguicidas para estimar el potencial de las sustancias de alcanzar las aguas superficiales y subterráneas, incluso antes de su aplicación (Adriaanse et al., 2015; Chen y Chen, 2022). Además, estos modelos permiten evaluar cómo las condiciones climáticas, las características de suelo y las condiciones de crecimiento del cultivo pueden influenciar el movimiento de los plaguicidas hacia los cuerpos de agua (Gali et al., 2020).

Una de las mayores limitaciones para el uso de estos modelos en ERAs para plaguicidas, es la falta de información integrada de las variables agroambientales, las variables climáticas, características del suelo, características morfológicas de los cuerpos de agua, parámetros físicos y químicos de los mismos, características propias de cada cultivo y todos los procesos físicos, químicos y biológicos que pueden afectar el comportamiento de un plaguicida en el ambiente, así como la correcta integración de todos estos factores en un solo análisis (Kienzler et al., 2016). Por esto se podría cuestionar la fiabilidad de un modelo predictivo con respecto a los datos de seguimiento específicos, sin embargo, un modelo matemático debidamente validado y ampliamente utilizado puede proporcionar una estimación de exposición realista, aunque cautelosa, en la que las autoridades reguladoras pueden fundamentar sus decisiones (Casallanovo et al., 2021). Es fundamental considerar el uso de estos modelos como herramientas accesibles, cuando ya han sido extensamente evaluados y validados con otros modelos conceptuales y datos sólidos.

La USEPA ha desarrollado un sistema de modelos y variables de escenarios que permiten estimaciones eficientes y oportunas de las concentraciones de plaguicidas en aguas superficiales y subterráneas, para su uso en la toma de decisiones regulatorias; uno de estos modelos es el Pesticide Root Zone Model (PRZM) y el Variable Volume Water Model (VVWM), que forman parte de la herramienta Pesticide in Water Calculator (PWC). Este modelo es ampliamente empleado por la USEPA y la Agencia de Regulación de Manejo de Plagas de Canadá (PMRA) (Young, 2019; Young y Fry, 2020).

El PWC es un modelo basado en algoritmos para hacer predicciones de la concentración de un determinado plaguicida en diferentes periodos de tiempo (Young, 2019; Young y Fry, 2020). Esta herramienta se encuentra de fácil acceso, es sencilla de usar, es sometida a revisiones periódicas y ha sido actualizada recientemente a la versión 2.001 (EPA, 2020), en la cual se han efectuado cambios en la interfaz, el modelo conceptual, el algoritmo, los escenarios de cultivo y los archivos meteorológicos (Young, 2019; EPA, 2020).

El modelo PWC proporciona escenarios normalizados para cultivos y zonas climáticas específicas de los Estados Unidos, por lo cual, estos escenarios no son adecuados para representar las condiciones de las regiones y cultivos de países tropicales (Carriquiriborde et al., 2014; De Oliveira y Vieira, 2022). Algunos investigadores han intentado desarrollar modelos locales para analizar el transporte de plaguicidas y su impacto ambiental, sin embargo, es una práctica compleja que requiere de muchos recursos. Otra opción es ajustar los escenarios ya existentes en la interfaz del modelo PWC a las condiciones específicas de la región de interés (Cambien et al. 2020; D'Andrea et al., 2020; Lora-Tamayo et al., 2020; Villalobos-Pérez et al., 2021; De Oliveira y Vieira, 2022). Esta estrategia tiene la ventaja de utilizar modelos ya probados y reconocidos internacionalmente (Lora-Tamayo et al., 2020; Casallanovo et al., 2021; Villalobos-Pérez et al., 2021).

La ventaja que ofrece el programa PWC respecto a otros programas similares, es que permite modificar los escenarios estándar que trae el modelo e introducir características locales de clima, suelo, hidrología y de manejo de los cultivos (D'Andrea, 2019, Lora-Tamayo et al., 2020; Villalobos-Pérez et al., 2021). Esta característica del modelo permite generar escenarios nuevos a escala de una región en particular y para cultivos para los cuales el programa original no incluye escenarios (De Oliveira & Vieira, 2022).

En el contexto latinoamericano, sería importante desarrollar escenarios para los cultivos locales y con las condiciones locales y así mejorar los cálculos de la PEC y asegurar que sean representativos de las condiciones ambientales locales (Casallanovo et al., 2021). Sin embargo en muchos, si no en la mayoría de los países latinoamericanos, los datos necesarios para desarrollar estos escenarios locales no están fácilmente disponibles a escala nacional y regional, como el caso de los cultivos de piña, en los cuales las características fenológicas del cultivo pueden variar dependiendo de la zona del país donde se siembre, por lo tanto, esto podría percibirse como un desafío para el desarrollo de escenarios locales (Carriquiriborde, et al., 2014; Casallanovo et al., 2021). Por esa razón, la generación y parametrización de los datos que requiere el PWC, para todos los posibles cultivos de interés, es un primer paso en busca de la creación y ajuste de los escenarios a condiciones propias del país. Según Carriquiriborde et al., (2014), los países de América Latina deben generar bases de datos que permitan determinar cuál de estos modelos se adapta de manera más realista a las condiciones agroambientales propias de cada país.

En el caso de Costa Rica, el acceso a la información de las características fenológicas y los manejos agronómicos de los diferentes cultivos en las diferentes zonas del país, es limitado y en muchos casos no son datos públicos, lo que se traduce en una urgente necesidad de generar e integrar las bases de datos existentes y así como dedicar recursos en la elaboración de escenarios de exposición representativos de la realidad del país. Debido a esta situación uno de las principales necesidades para el país, es la formación un equipo de investigación multidisciplinario dedicado únicamente a buscar, investigar y comprender todos los parámetros que requiere el programa PWC y las posibles interacciones entre todos los valores de entrada del programa, e incentivar investigaciones dedicadas a la caracterización de suelos, clima, hidrología para las diferentes regiones del país (De Oliveira y Vieira, 2022).

II. MARCO TEÓRICO

Los plaguicidas como contaminantes de cuerpos de agua.

La dinámica de los plaguicidas en el ambiente es compleja y depende de una serie de factores, como las características del plaguicida, la naturaleza del suelo, la topografía del terreno, el clima y las prácticas agrícolas. Según Mac-Loughlin (2021), el comportamiento de un plaguicida en el medio ambiente está influenciado por sus propiedades fisicoquímicas, mecanismos de transporte, mecanismos de acumulación, degradación y las características del lugar en el que se aplica, por lo que, una vez aplicados, los plaguicidas pueden ser transportados y distribuidos de diferentes maneras a los diferentes compartimentos ambientales.

Una de estos compartimentos son los cuerpos de agua, los cuales se pueden contaminar por arrastre superficial del plaguicida hacia ríos, lagos y estanques, afectando la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos, o por infiltración del suelo, alcanzando las aguas subterráneas y convirtiéndose en una fuente de contaminación de los acuíferos y los pozos de agua potable (Valenzuela et al., 2020). Los plaguicidas tienen la capacidad de llegar a cuerpos de agua mediante diversos procesos, como descargas directas al agua, movimiento por escorrentía superficial, deriva de la pulverización e infiltración en el suelo (Fig. 1) (Valenzuela et al., 2020; Mac-Loughlin, 2021).

Los eventos de escorrentía superficial en plantaciones, están directamente ligados a eventos de lluvia o de riego de cultivos (Valenzuela et al., 2020). La escorrentía es un proceso natural que se debe considerar en los cultivos al aplicar productos químicos, ya que residuos de estos productos son arrastrados por el agua sobre la superficie del suelo y fluyen hacia los cuerpos de agua cercanos por la topografía del terreno (Fig.1) (Valenzuela et al., 2020). Aunque la escorrentía es un proceso importante para mantener el ciclo hidrológico natural, en los cultivos de alta demanda de agua, como el caso de la piña, si el suelo está saturado de agua, el agua adicional no puede filtrarse, por lo tanto, aumenta la cantidad de escorrentía y como consecuencia aumenta el arrastre de los plaguicidas (Mac-Loughlin, 2021).

En cuanto a la lixiviación o la infiltración en el suelo es el proceso por el cual el agua y los productos químicos se mueven a través del suelo y llegan a las capas freáticas y cuerpos de agua subterráneos (Concha-Ramírez, 2021). La velocidad y grado de lixiviación de los plaguicidas dependen de varios factores, como la solubilidad del plaguicida, el tipo de suelo, la cantidad de lluvia y la intensidad de la aplicación del plaguicida (Fig.1) (Valenzuela et al., 2020). La infiltración de plaguicidas en el suelo puede ser especialmente problemática en áreas donde hay agua subterránea cerca de la superficie del suelo, como en áreas de cultivo intensivo, donde se aplican grandes cantidades de plaguicidas (Mac-Loughlin, 2021).

Otro mecanismo de transporte de plaguicidas a cuerpos de agua es a través de la deriva de pulverización. Este proceso ocurre cuando los productos químicos aplicados se mueven fuera del área cultivada durante la aplicación (Concha-Ramírez, 2021, Mac-Loughlin, 2021). Cuando se aplica un plaguicida, una parte del producto químico puede quedarse en la superficie tratada, mientras que otra parte se convierte en una neblina o una nube de pequeñas partículas que se mueven en el aire (Fig.1) (Mac-Loughlin, 2021). La deriva de pulverización puede resultar en la contaminación de áreas no destinadas, como las zonas de cultivo vecinas, las áreas residenciales cercanas o los cuerpos de agua cercanos (Concha-Ramírez, 2021).

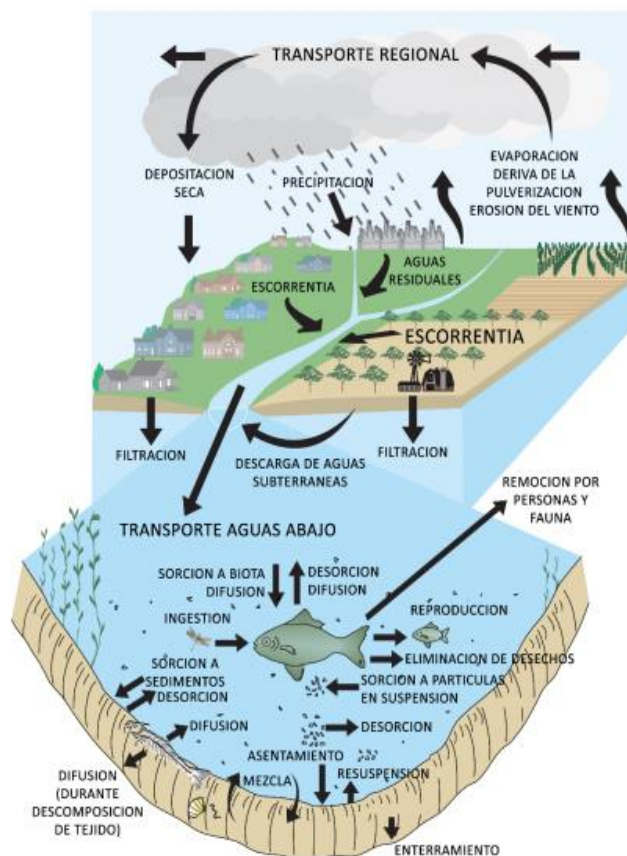


Figura 1. Dinámica ambiental de plaguicidas. Tomado de Mac-Loughlin (2021).

Además de las características del clima y del suelo, las características agronómicas del cultivo pueden influir en los mecanismos de movimiento de los plaguicidas fuera de las áreas de aplicación (Zhu et al., 2019, Chiunti y Gamboa, 2021). Las características fenológicas de un cultivo se refieren a los diferentes estadios de crecimiento y desarrollo que experimenta una planta cultivada a lo largo del ciclo de cultivo, como la germinación, el crecimiento vegetativo, la floración, la fructificación y la madurez. Además, comprende la relación del crecimiento de la planta con factores ambientales como la temperatura, la luz y la humedad. (MAG, 2018). Según Vera (2022), la absorción de plaguicidas por las plantas puede variar en función de la etapa de crecimiento del cultivo, lo que puede afectar la eficacia del control de plagas y la exposición a plaguicidas en el medio ambiente.

En el caso específico de los cultivos de piña, durante la etapa de establecimiento, la planta presenta ciertas limitaciones en su sistema de raíces subdesarrollado y menor área foliar, lo que podría influir en una menor absorción de los plaguicidas (MAG, 2018). No obstante, esta etapa también puede favorecer una mayor deriva, ya que la planta es más pequeña y no proporciona una barrera efectiva para la pulverización (González-Morales et al., 2019).

Por otro lado, durante la etapa de crecimiento, la planta presenta un sistema de raíces más desarrollado y una mayor área foliar, lo que incrementa su capacidad de absorción de los plaguicidas. En esta etapa la planta se encuentra en su fase de crecimiento más activo, lo que la hace más susceptible a las plagas y enfermedades por lo que es la etapa de mayor aplicación de plaguicidas (MAG, 2018). En esta etapa, la aplicación de plaguicidas puede resultar en una menor deriva debido a que la planta es más grande y proporciona una barrera más efectiva para la pulverización. (González-Morales et al., 2019).

Mientras que, en la etapa de floración de la planta y fructificación, la aplicación de plaguicidas se puede reducir o incluso evitar en algunos casos para evitar la contaminación del fruto y garantizar su calidad para la comercialización (MAG, 2018). Además, la planta ya ha alcanzado su máximo desarrollo tanto de las flores como del fruto y, por lo tanto, puede proporcionar una barrera más efectiva para la pulverización ya que pueden actuar como trampas para las gotas de pulverización de plaguicidas (MAG, 2018), lo que podría disminuir la deriva de plaguicidas a cuerpos de agua cercanos (González-Morales et al., 2019).

Debido a la influencia que tienen las características fenológicas y agronómicas de un cultivo sobre la distribución de los plaguicidas en el ambiente, al realizar una ERA en especial al calcular la PEC, se deben tomar en cuenta las diferentes etapas del cultivo, el tiempo que abarca cada una de las etapas, así como la variación de la demanda en la cantidad y clase de plaguicidas (D'Andrea, 2019). Por lo tanto, al modificar las variables agronómicas del cultivo, se pueden alterar las predicciones del modelo, como es el caso del PWC (Young y Fry, 2014; Young, 2019; Young y Fry, 2020). Es importante determinar cuál es el nivel de impacto que tiene la modificación de estas variables sobre el resultado de la PEC del modelo y así utilizar el modelo de manera responsable con resultados que permitan minimizar el impacto de los plaguicidas en el medio ambiente.

Modelo PWC

El modelo PWC es un programa que permite hacer simulaciones de aplicaciones de plaguicidas en un campo agrícola adyacente a un cuerpo de agua y así estimar la concentración de plaguicida que tiene el potencial de movilizarse a dicho cuerpo de agua (Young, 2015, 2016, 2019). El PWC se basa en datos tales como el método de aplicación del plaguicida y su efecto en el transporte, así como las características físico químicas inherentes de las sustancias, en conjunto con datos de los procesos químicos y biológicos que pueden intervenir en la movilización de las moléculas, tales como fotólisis, vida media del plaguicida en el suelo, degradación foliar, hidrólisis, vida media en la columna de agua, entre otros (Young y Fry, 2014; Young, 2019; D'Andrea, 2019; Young y Fry, 2020). Estos procesos químicos y biológicos se pueden estimar y así generar parámetros estándar para cada plaguicida, mediante la incorporación de los datos propios del plaguicida y de supuestos ambientales estándares (D'Andrea et al., 2020).

El modelo se compone de dos etapas, la primera es la entrada de información, donde el usuario ingresa datos acerca de las características intrínsecas de la molécula a aplicar, el área de aplicación, la ubicación geográfica, el tipo de suelo, la topografía y el clima. Además, se incluye información acerca del patrón de uso autorizado, el tipo de aplicación, tasa de aplicación, frecuencia de aplicación y las características fenológicas del cultivo de interés. Una vez que se han ingresado los datos, la segunda etapa del modelo se enfoca en el cálculo de la concentración predicha de plaguicidas en el agua superficial y subterránea, para un área específica y en un periodo máximo de un año después de la aplicación. (Young, 2019; D'Andrea et al. 2020; Oliveira y Vieira, 2022)

En la segunda etapa del modelo, intervienen otros dos modelos que interactúan estrechamente para finalmente dar una concentración de plaguicida esperada en cuerpos de agua subterráneos o superficiales (Young 2015; D'Andrea et al., 2020). Estos otros dos modelos son, el Modelo de Zona de Origen del Plaguicida o “*Pesticide Root Zone Model (PRZM-5)*” versión 5.02 (Young & Fry, 2014) y el Modelo de Volumen Variable del Cuerpo de Agua o “*Variable Volume Water Model (VVWM)*” versión 1.0 (Fig.2) (Fry et al., 2014). Los datos

generados por PRZM son utilizados en el modelo VVWM para simular un cuerpo de agua estándar que recibe plaguicidas del campo agrícola estándar (Young 2015, 2016, 2019).

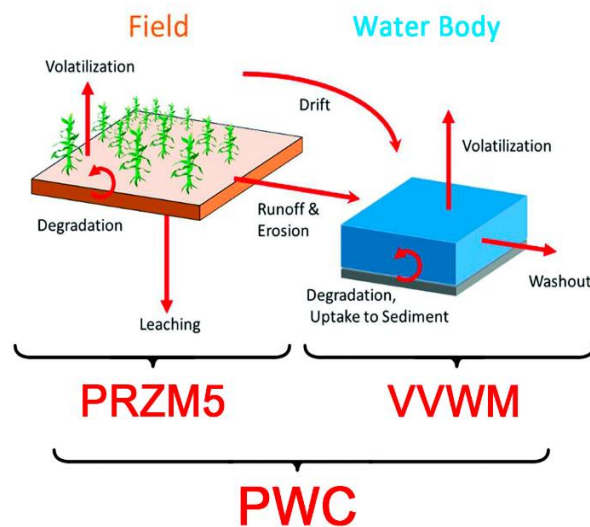


Figura 2. Diagrama sobre la interacción de los diferentes interfaces del modelo PW, para calcular la exposición a plaguicidas en cuerpos de agua. Tomado y adaptado de Young 2019.

Modelo de Zona de Origen del Plaguicida (PRZM-5)

PRZM-5 es un modelo de compartimentación ambiental de campo que se emplea para simular el transporte y la transformación de plaguicidas desde la zona no saturada del suelo, agua subterránea y superficie del suelo hacia los cuerpos de agua (Young y Fry 2014; Fry et al., 2016; Young, 2019). Este modelo tiene en cuenta varios factores, incluyendo el crecimiento de los cultivos, las características del suelo, los patrones climáticos, la hidrología del campo y el destino de los plaguicidas (Fry et al., 2016; Chen et al., 2017; D'Andrea 2019; Young 2019; Cheng et al., 2020).

El modelo PRZM emplea datos meteorológicos de hasta 30 años de duración, que incluyen variables como la precipitación diaria, la evaporación, la temperatura, la velocidad del viento

y la radiación solar, con el fin de realizar simulaciones en periodos determinados (Chen et al., 2017; Cheng et al., 2020). Durante la simulación, el modelo calcula la escorrentía diaria y los flujos de dispersión en campos "estándar" que han sido parametrizados para representar regiones y cultivos específicos de los Estados Unidos de América (Young 2019; Cheng et al., 2020).

El PRZM-5 es un modelo de caja, lo que significa que la simulación se realiza en una única "caja" que representa una parcela de tierra determinada. La caja se divide en capas de suelo y el modelo tiene en cuenta la infiltración de agua, el movimiento del agua y los plaguicidas en el suelo y la evaporación (Fig.3) (Carsel et al., 1985, Fry et al., 2016; Chen et al., 2017, 2020). También tiene en cuenta la dinámica del agua subterránea y la exposición del medio ambiente a los plaguicidas (Chen et al., 2017, 2020).

El PRZM-5 tiene una serie de limitaciones, incluyendo la falta de datos precisos y actualizados, la variabilidad en la dinámica del suelo y la imposibilidad de representar con precisión la complejidad del medio ambiente en un solo modelo (Carsel et al., 1985), por lo que es importante que los datos de entrada que se incorporen en el modelo sean realistas y actualizados del área que se quiere evaluar (Fry et al., 2016; Chen et al., 2017).

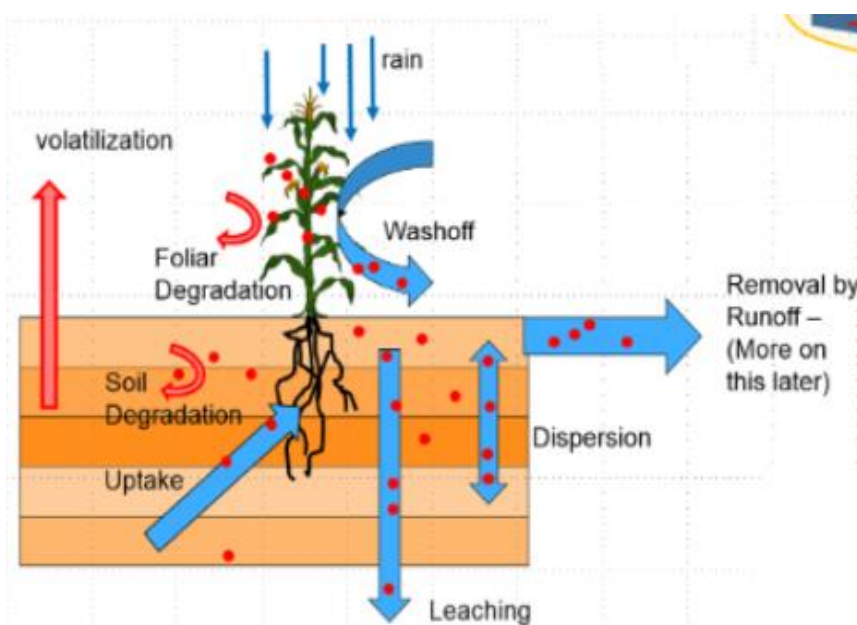


Figura 3. Diagrama del modelo Pesticide Root Zone Model (PRZM), entradas, salidas y procesos que incluyen en la transformación de una molécula. Tomado de Sinnathamby (2018).

Modelo de Volumen Variable del Cuerpo de Agua (VVWM)

El modelo VVWM es un modelo de simulación numérica utilizado para evaluar la calidad del agua y la exposición a contaminantes en cuerpos de agua superficiales, como lagos, ríos y embalses (Young 2019). El modelo se basa en la teoría del equilibrio de masa y tiene en cuenta los procesos de transporte, transformación y eliminación de contaminantes en el agua, se utiliza para representar un segmento de un cuerpo de agua estándar, el cual recibe una carga directa de plaguicidas (Young, 2016, 2019).

El modelo VVWM utiliza una serie de ecuaciones matemáticas que establecen la relación entre las características fisicoquímicas de los plaguicidas y las variables limnológicas que influyen en el movimiento, transporte y destino de los plaguicidas hacia los cuerpos de agua (Fry et al., 2014; Pérez-Indoval et al., 2021). Además, el modelo tiene en cuenta la influencia de factores meteorológicos, hidrológicos y las propiedades físico-químicas del cuerpo de agua (Luo et al., 2019). El modelo segmenta el cuerpo de agua en compartimentos con volúmenes diferentes y estima la concentración de contaminantes en cada compartimento a lo largo del tiempo (Young, 2016; 2019). Los compartimentos se dividen en tres categorías: agua superficial, sedimentos y capas profundas de agua (Fig.4).

Los cuerpos de agua que pueden modelarse incluyen aguas que fluyen, como arroyos o ríos, o aguas más estáticas, como embalses o lagos. El cuerpo de agua se modela como un solo segmento de interés (que comprende una columna de agua y una región bentónica), siendo el segmento de relevancia el que recibe la aplicación directa de la sustancia química (Luo et al., 2019; Xie et al., 2021). La integración de los datos de un cuerpo de agua estándar y los datos de suelo y clima de un campo estándar forman los escenarios estándar del modelo PWC (Young, 2019).

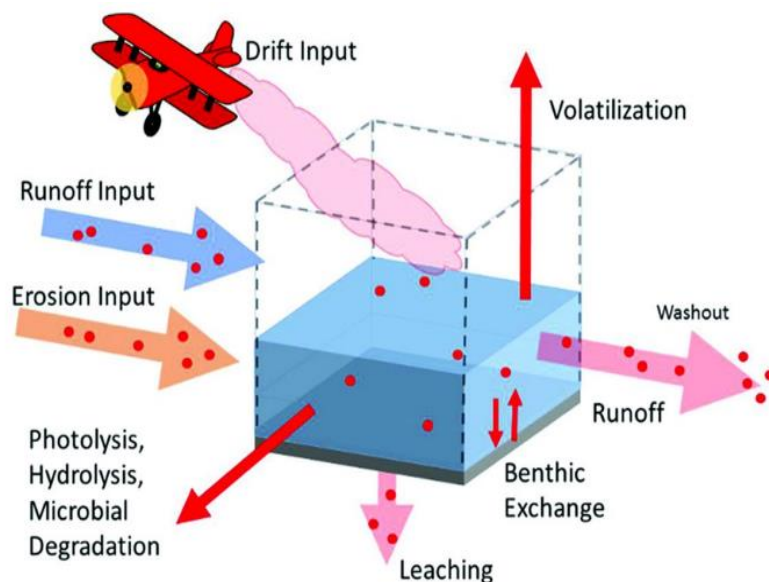


Figura 4. Diagrama de un cuerpo de agua estándar que muestra entradas, salidas y procesos que incluyen en la transformación de una molécula. Tomado de Young 2019.

Escenarios de exposición

Los escenarios de exposición consisten en conjuntos de datos estándar que caracterizan diferentes condiciones agroambientales para un área y un cultivo en particular (Focks et al., 2014; De Oliveira y Vieira, 2022). Son una forma de integrar la variabilidad climática, edáfica, fenológica, hidrogeológica y del manejo agronómico de una determinada región, con zonas que tengan condiciones homogéneas en lo que respecta a todas las variables de entrada que requiere el modelo, es decir realizar un agrupamiento de datos (Goumenou et al., 2021; De Oliveira y Vieira, 2022). Es así como los escenarios integran los datos fisicoquímicos y relativos a la aplicación de los plaguicidas, en combinación con uno o varios modelos que simulan el destino del plaguicida en el ambiente; dando como resultado una estimación de la concentración del plaguicida en el cuerpo de agua exclusiva para las condiciones de ese escenario, la cual se conoce como concentración ambiental predicha (PEC) (Iturburu et al., 2019; Goumenou et al., 2021; De Oliveira y Vieira, 2022).

El PWC ofrece escenarios para varios cultivos en función de diferentes regiones de USA, por lo que al realizar una simulación en un cultivo cuyo escenario ya está disponible, únicamente se deben incorporar los datos físicos y químicos del plaguicida y el patrón de uso (Young, 2016; 2019). Sin embargo, al realizar una simulación con un cultivo para el cual no existe un escenario como es el caso del cultivo de piña, el modelo requiere la introducción de diversas variables, en total, excluyendo los datos de clima y suelo, es necesario caracterizar 62 variables antes de realizar una simulación con PWC (Anexo 1). Estas variables se pueden agrupar en tres grandes categorías de datos: i) los datos de las características físicas y químicas y comportamiento ambiental del plaguicida a evaluar, ii) los datos de la fenología del cultivo a escala local y iii) los datos locales de las variables climáticas, de las características del suelo y de las dimensiones y propiedades del cuerpo de agua (De Oliveira y Vieira, 2022).

La ventaja que ofrece el programa PWC respecto a otros programas similares es que permite modificar las variables de los escenarios estándar disponibles o bien crear nuevos escenarios, siempre y cuando se tenga disponible la información de todas las variables (D'Andrea 2019, De Oliveira y Vieira, 2022). Esta flexibilidad del programa PWC, permite la creación de nuevos escenarios con valores de entrada propios de las condiciones y cultivos para países de América Latina, permitiendo realizar evaluaciones de riesgo con escenarios más realistas a las condiciones propias de cada país (Lora-Tamayo et al., 2020; Villalobos-Pérez et al. 2021; De Oliveira y Vieira, 2022).

Actualmente el modelo contempla tres categorías de escenarios, las cuales abarcan escenarios para calcular las PECs en aguas destinadas al consumo humano, escenarios para evaluaciones ecológicas y escenarios para evaluaciones de aguas subterráneas, cada una de estas categorías incluye diversos grupos de cultivos. Aunque el modelo cuenta con una amplia variedad de cultivos para las evaluaciones de aguas subterráneas, los escenarios disponibles actualmente únicamente abarcan los cultivos de papa, cítricos, maní, algodón y maíz (EPA, 2023).

A pesar de que constantemente se actualizan los escenarios en el modelo, para muchos de los cultivos propios de las regiones tropicales como la piña, no hay escenarios disponibles, en consecuencia, al no tener un escenario propio y estar disponibles todos los datos disponibles para crear uno, es necesario seleccionar un escenario ya existente en el cual el cultivo

presente algunas similitudes y utilizarlo como punto de partida para modificar los datos disponibles sobre el cultivo y la región de interés. Se debe tomar en cuenta que entre más datos se modifiquen, mayor será la representatividad de los resultados para el nuevo cultivo de interés (D'Andrea 2019; Lora-Tamayo et al., 2020; Villalobos-Pérez et al. 2021; De Oliveira y Vieira, 2022).

Es así que, como parte del proceso de creación de nuevos escenarios, la identificación de las variables más sensibles de un modelo matemático representa un primer paso hacia la reducción de la incertidumbre en los resultados (Franczyk, 2019; Alfaro-Vives y Mas-Diego, 2022; De Oliveira y Vieira 2022). Además, detectar las variables no influyentes puede disminuir el tiempo de cálculo sin reducir el rendimiento del modelo (Franczyk, 2019; Alfaro-Vives y Mas-Diego, 2022). En las pautas de buenas prácticas para la implementación de modelos (USEPA, 2020), se recomienda realizar un análisis de sensibilidad como una forma cuantitativa de evaluar la incertidumbre en los resultados del modelo.

Análisis de Sensibilidad

Los análisis de sensibilidad generan información preliminar que permite identificar y entender cuáles variables del modelo PWC deben modificarse en los diferentes escenarios estándar que incluye el modelo, para aplicarlo a regiones con características agroambientales diferentes a las de los EE.UU. Además, generan una línea de orientación sobre la dirección en que deben dirigirse los esfuerzos de investigación al momento de generar bases de datos para utilizar el modelo PWC en evaluaciones de riesgo ambiental y tener resultados representativos de cada región en específico.

Existen múltiples enfoques para llevar a cabo un análisis de sensibilidad y la selección del método apropiado se basa en diversos factores, tales como la naturaleza de la información requerida, el número de variables del modelo y la capacidad de cómputo disponible (Wolt et al. 2002; Saltelli et al., 2008; Pianosi et al., 2016). El método de Morris (Morris, 1991) representa una técnica de análisis de sensibilidad local que permite estimar el impacto individual de cada parámetro en la salida del modelo (Saltelli et al., 2008). Este método presenta un bajo costo computacional y resulta particularmente útil para identificar aquellos parámetros que no influyen en la salida del modelo, los cuales pueden ser descartados

previamente a la aplicación de técnicas de análisis de sensibilidad global más complejas y costosas (Pianosi et al., 2016).

El método de los efectos elementales de Morris

El método de Morris (Morris, 1991) es una técnica de análisis de sensibilidad que permite identificar las variables menos sensibles dentro de un modelo matemático mediante un diseño tipo “un parámetro a la vez” (OAT, por sus siglas en inglés), que consiste en variar un parámetro a la vez, con varias repeticiones, a las cuales se les denomina trayectorias (Saltelli, 2008; Iooss et al., 2014; Sarrazin et al., 2016). Este diseño de variación de un único parámetro a la vez dentro de sus límites máximos y mínimos, mientras que los demás parámetros se mantienen constantes, permite identificar los parámetros que no tienen un impacto significativo en la salida del modelo, por lo tanto, pueden ser excluidos del análisis de sensibilidad global para reducir el costo computacional (Pianosi et al., 2016).

En el análisis de sensibilidad de Morris, los valores de los parámetros se varían sistemáticamente para producir una distribución uniforme de los resultados, y se evalúa la respuesta del modelo a cada combinación de valores de parámetros (Morris, 1991; Marrel et al., 2009; Saltelli, 2018). Se utilizan dos medidas de sensibilidad: el primer orden, que evalúa el impacto directo de cada parámetro en la salida del modelo, y el segundo orden, que da como resultado el índice de sensibilidad total. Este análisis permite medir el impacto total de cada parámetro, incluyendo las interacciones con los demás parámetros. (Saltelli 2004; Iooss et al., 2014).

Esta técnica es ampliamente utilizada para evaluar la sensibilidad de los resultados de un modelo a las incertidumbres en los parámetros y a las condiciones ambientales (Saltelli et al. 2008), y es particularmente útil para la evaluación de modelos de simulación de sistemas complejos, como modelos de calidad del agua, modelos de cambio climático y modelos de sistemas biológicos (Sinnathamby et al., 2020; Wang et al., 2020).

El método de Morris es una herramienta útil para modelos con múltiples variables de entrada, como el PWC, ya que permite identificar aquellas variables que tienen una baja sensibilidad en el resultado del modelo (Morris, 1991). Este método utiliza un enfoque de muestreo

sistemático para generar un conjunto aleatorio de experimentos en el espacio multidimensional definido por los posibles valores de las variables. Se basa en dos medidas de sensibilidad: μ (media), que caracteriza la influencia de un parámetro dado sobre la salida y σ (desviación estándar) que se utiliza para detectar factores involucrados en la interacción con otros factores o cuyo efecto no es lineal (Saltelli, 2008).

En general, los parámetros con valores de índice de sensibilidad de primer orden y total altos deben ser considerados cuidadosamente en cualquier análisis posterior del modelo. Por otro lado, los parámetros con valores bajos de ambos índices de sensibilidad pueden ser excluidos del análisis posterior, debido a su bajo impacto en la salida del modelo (Morris 1991; Saltelli, 2008; Gao y Bryan, 2016; Alfaro-Vives y Mas-Diego, 2022). Los datos de entrada requeridos para el PWC son muy amplios y variados, por lo que conviene que el análisis de sensibilidad se enfoque en un grupo específico de datos, como son los factores fenológicos.

Interpretación de un gráfico de Morris

Un gráfico de análisis de sensibilidad de Morris incluye dos ejes principales: el eje X (μ), que representa el nombre o el número de identificación de cada variable evaluada y el eje Y (σ), que representa la respuesta del modelo a cada combinación de valores de las variables (Paleari et al., 2021). Cada punto en el gráfico representa una combinación única de valores y la ubicación de cada punto en el gráfico se relaciona con la magnitud de la respuesta del modelo a esa combinación de valores de cada parámetro evaluado (Saltelli, 2008; Gao y Bryan 2016). Además, la forma y la ubicación de los puntos en el gráfico pueden ser utilizadas para identificar interacciones entre los parámetros (Fig.5) (Morris, 1991).

Campolongo et al. (2007), han propuesto una medida integrada con el resultado del análisis Morris μ , denominada μ^* , esta nueva medida sirve para clasificar los factores de entrada según su importancia en el modelo. Para obtener medidas de sensibilidad más informativas, se calcula μ^* como la media de la distribución y σ como la desviación estándar. De esta manera, μ^* se utiliza para detectar factores de entrada con una influencia global significativa en la salida, mientras que σ se utiliza para detectar factores que interactúan con otros factores o cuyo efecto no es lineal (Campolongo et al., 2007). En general, la nueva medida μ^* resulta

ser más eficaz que la versión anterior del Morris μ en la clasificación de factores por importancia en un análisis de sensibilidad.

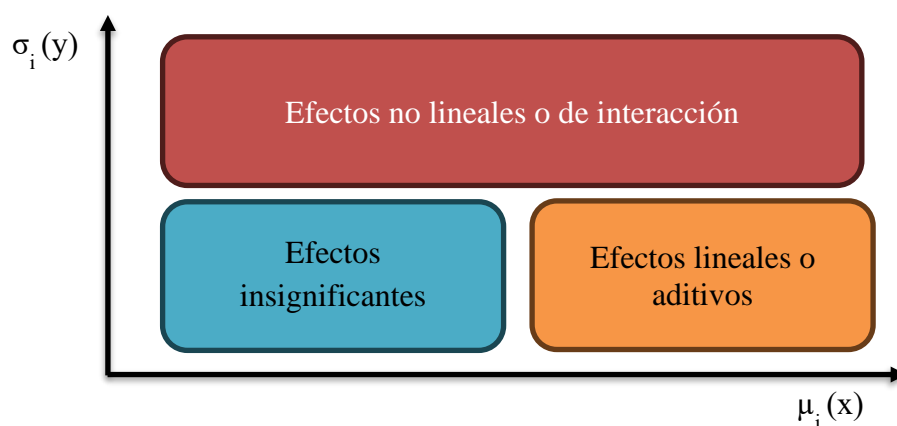


Figura 5. Representación esquemática de la disposición teórica de las medias μ_i^* y las desviaciones estándar σ_i de la distribución de efectos. Tomado de Alfaro-Vives y Mas-Diego, 2022.

Los puntos en el gráfico representan los parámetros del modelo y su posición en el gráfico indica su impacto en la salida del modelo (Campolongo et al., 2007). Los parámetros con un alto valor de índice de sensibilidad de primer orden (efectos lineales y aditivos, fig. 5) tienen un impacto directo importante en la salida del modelo, mientras que los parámetros con un alto valor de índice de sensibilidad total (efectos no lineales o de interacción, fig. 5) tienen un impacto total importante, incluyendo las interacciones con otros parámetros (Morris, 1991; Gao y Bryan 2016; Alfaro-Vives y Mas-Diego, 2022).

La zona Huetar Norte de Costa Rica

A pesar de que la parametrización de modelos requiere datos actualizados y específicos de cada región y cada cultivo, un primer paso hacia la generación de escenarios locales es la generación de datos para cultivos y zonas representativas, que permitan la extrapolación de información a otras áreas o cultivos con condiciones similares. En el caso específico de la piña, una de las regiones más representativas, es la Región Huetar Norte (RHN) del país la cual es la responsable de la mayoría de la producción de piña en Costa Rica.

De acuerdo con los resultados del VI Censo Nacional Agropecuario (INDER, 2021), la producción de piña en Costa Rica se concentra principalmente en tres regiones: la Huetar Atlántica, la Huetar Norte y el Pacífico Sur. Sin embargo, la mayor cantidad de fincas dedicadas al cultivo de piña se encuentra en la RHN (COMEX, 2020; MAG 2021). La distribución de las áreas de siembra (Fig. 6), está en 16 cantones, divididos en las siguientes subregiones: Zona Norte Norte (ZNN) 24.653 hectáreas (56% del área cultivada); Atlántico 11.188 hectáreas (25%), Pacífico 8.659 hectáreas (19% del área cultivada) (CANAPEP, 2021).

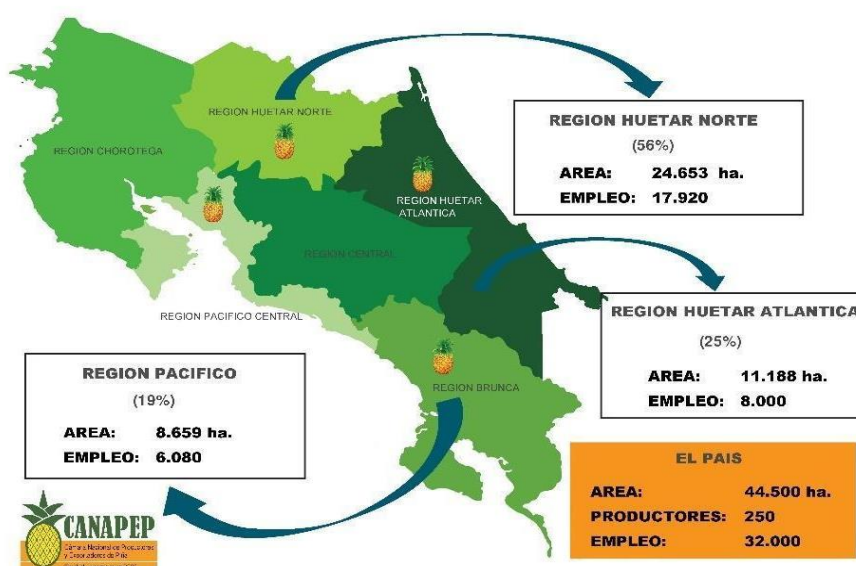


Figura 6. Distribución de las regiones dedicadas al cultivo de piña en Costa Rica (Tomado de CANAPEP 2021).

La ZNN comprende los cantones de Upala, Los Chiles y Guatuso. Esta subregión se ha convertido en un área importante para el cultivo de piña, debido a sus condiciones climáticas favorables para dicho cultivo, como un clima cálido y húmedo durante todo el año, lo que permite una producción constante de la fruta. Además, la zona cuenta con suelos ricos en nutrientes y bien drenados, lo que es importante para el crecimiento y desarrollo de las plantas de piña (COMEX 2020; MAG, 2021).

Esta zona se caracteriza por presentar gran diversidad geográfica, que incluye llanuras, montañas, volcanes y bosques nubosos. Esta variabilidad de terrenos hace que la región tenga

una gran variedad de ecosistemas, lo que se traduce en una rica diversidad de flora y fauna (Barrientos y Chaves, 2008). Esta región se encuentra en la zona tórrida, con un clima tropical de dos épocas, la época lluviosa que va de mayo a enero o febrero y la estación seca de marzo a mayo, con algunas precipitaciones esporádicas ocasionadas por los frentes fríos del norte (MAG, 2021).

Debido al alta intensidad de siembra de piña y a la diversidad de ecosistemas, esta región del país es adecuada para generar, investigar e integrar la información sobre las características propias del cultivo, el manejo agronómico del mismo y las características de suelo y así parametrizar un posible escenario para el cálculo de PEC en cultivos de piña, mediante el modelo PWC, cuyos resultados se puedan extrapolar a otras regiones del país donde se siembra piña.

III. OBJETIVOS

1. Objetivo general

Evaluar la influencia de las variables agronómicas en el modelo PWC, para la parametrización de un escenario representativo de las condiciones locales, para el cultivo de piña en Costa Rica.

2. Objetivos específicos

- 2.1. Generar bases de datos que caracterizan los parámetros ambientales y agronómicos y fenológicas de un cultivo de piña en la Zona Norte del país, así como las características de los plaguicidas autorizados para este cultivo.
- 2.2. Determinar la sensibilidad de las variables agronómicas en el cálculo del PEC, con el modelo PWC en el cultivo de piña, mediante un análisis de sensibilidad.
- 2.3. Proponer posibles valores de entrada para un escenario de exposición con datos locales, para el uso del modelo PWC en las evaluaciones de riesgo ambiental en el cultivo de piña en Costa Rica.

IV. METODOLOGÍA

Se realizó el cálculo de PEC con el modelo PWC para analizar la sensibilidad de las variables agronómicas incluidas en este modelo, específicamente de la fenología del cultivo de piña. Para esto, se plantearon 3 pasos a seguir (cuadro 1).

Cuadro 1. Información requerida y pasos a seguir para el cálculo de PEC y el análisis de sensibilidad de las variables agronómicas del modelo PWC en un cultivo de piña.

Pasos de la metodología	Información necesaria
1. Parametrización de los datos	¿En qué zona de CR se cultiva más piña?
	¿Cuáles son los datos ambientales de esta zona?
	¿Cuáles son las características agronómicas del cultivo de piña?
	¿Cuáles plaguicidas están autorizados para ese cultivo?
	¿Cuáles son las propiedades físicas y químicas de esos plaguicidas?
	¿Cuál es el patrón de uso aprobado para cada una de las moléculas en cultivos de piña de Costa Rica?
	¿Cuáles son las características de comportamiento ambiental de esos plaguicidas?
2. Análisis de sensibilidad de las variables agronómicas.	¿Cuál escenario PWC tiene características similares a un cultivo de piña?
	¿Cuál de las variables agronómicas tiene mayor influencia en el resultado del modelo?
3. Descripción de un escenario con variables agronómicas más realistas para el cultivo de piña	¿Cuáles características se pueden modificar para que ese escenario se aproxime a las condiciones del cultivo en Costa Rica?
	¿Existen en CR, todos los datos requeridos por

	el modelo PWC, para generar nuevos escenarios?
--	--

1. Parametrización de los datos

1.1. Selección de la zona geográfica

Para aplicar el modelo PWC, se seleccionó la ZNN del país, específicamente el cantón de Los Chiles, debido a que es la zona del país con mayor área dedicada al cultivo de piña en Costa Rica y exhibe un rango de características de suelo y clima que se pueden extrapolar a los otros cantones de la subregión.

1.2. Datos ambientales de la Región Huetar Norte

1.2.1. Variables climáticas.

Los datos climáticos se solicitaron al Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN), y se obtuvieron los datos de 11 estaciones meteorológicas de la Zona Norte (cuadro 2). Se seleccionó la estación que tuviera más de 20 años de datos de todas las variables climáticas que se requieren (temperatura, precipitación, velocidad del viento, evapotranspiración, radiación solar). Se elaboró un archivo CSV (delimitado por comas) en el que se extrajeron los datos diarios de dichas variables correspondientes al periodo de 1/1/1997 al 31/10/2022 de acuerdo con los requerimientos del modelo PRZM5.

Cuadro 2. Datos de las estaciones meteorológicas de la Región Huetar Norte proporcionados por el Instituto Nacional Meteorológico de Costa Rica.

Cuadro tomado de IMN-DIM-CM-284-2022

Número	Nombre	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (m.s.n.m)	Periodo	
					Inicio	Fin
69633	Comando Los Chiles	11° 01' 54"	84° 42' 42"	40	1/1/1997	31/10/2022

69635	CoopeVega	10° 43' 07"	84° 24' 01"	10	1/2/1997	30/6/2022
69647	Finca Brasilia del Oro	10° 58' 59"	84° 20' 50"	380	7/11/2002	31/10/2022
69677	Laguna, Caño Negro	10° 53' 31"	84° 47' 17"	37	29/3/2001	13/10/2021
69679	Upala	10° 52' 51"	84° 04' 21"	60	26/3/1997	31/10/2022
69681	La Rebusca	10° 29' 00"	84° 01' 00"	40	6/5/1999	7/7/2022
69699	Betania, Cutris	10° 38' 39"	84° 22' 55"	100	15/3/2011	27/10/2022
69701	ITCR, San Carlos	10° 21' 38,2"	84° 30' 48,7"	183	21/9/2011	14/10/2022
69709	San Gerardo, Sarapiquí	10° 24' 57,40"	84° 09' 29,10"	210	20/8/2012	08/07/2022
69723	Piñales las Delicias	10° 26' 41"	84° 18' 55"	140	10/10/2013	27/10/2022
69727	Adifort, La Fortuna San Carlos	11° 28' 04"	84° 38' 50"	266	26/3/2014	31/10/2022

Este modelo requiere el uso de un archivo meteorológico, especificado en el archivo de entrada de PRZM5 (Sección 2.2) y leído por ReadInputs.f90. En cada registro del archivo meteorológico se incluyó información sobre la precipitación diaria, la evapotranspiración, la temperatura, la velocidad del viento y la radiación solar. Se utilizó un archivo con formato “.wea” (Fry et al. 2016). El archivo de clima debe tener la siguiente estructura y en ese orden específico:

Mes – Día – Año - Precipitación (cm/d) - ET0 (cm/d) - temperatura (°C) - velocidad del viento (cm/s) - radiación solar (La/d).

En cuanto a las unidades de los valores, se realizó la conversión de las unidades según lo indicado en el siguiente cuadro (Cuadro 3).

Cuadro 3. Conversión y cálculos de las variables climáticas que requiere el modelo PRZM5. Tomado, traducido y adaptado de Fry et al. (2016)

VARIABLES	UNIDADES DEL IMN	UNIDADES QUE REQUIERE EL PRZM5	CÁLCULO PARA CONVERSIÓN DE UNIDADES
Precipitación	mm/día	cm/día	$P_{cm} = 0.1 P_{mm}$
Temperatura	celcius (°C)	celcius (°C)	No se debe convertir
Velocidad del viento	m/s	cm/s	$V_{m/s} = 100 V_{cm/s}$
Radiación solar	MJ/m ²	La/día	$MJ/m^2 = 11.574074$
			$W/m^2 = 2.06364 La/día$
Evapotranspiración	mm/día	cm/día	$ET (mm/d) = 0.1 ET (cm/d)$

1.2.2. Los datos del suelo

Los datos de las características del suelo se obtuvieron de las bases de datos de Principales Suelos de Costa Rica del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 2016), Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA, 2016) y Mapa Digital de Suelos y la Base de Datos de Perfiles de Suelos de Costa Rica del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA-UCR, 2016), y de trabajos de investigación realizados en suelos ultisoles en la ZNN.

1.2.3. Datos del cuerpo de agua

Los parámetros físicos del cuerpo de agua fueron constantes en todos los cálculos realizados y se utilizaron los valores predeterminados por el programa PWC, el modelo utiliza como escenario estándar un cuerpo de agua ubicado junto a un cultivo, donde el cuerpo de agua es un estanque de granja que representa un escenario de exposición altamente vulnerable. Este escenario supone un campo de 10 ha tratado con plaguicidas que se mueven en un estanque de granja estático de 1 ha con una profundidad de 2m, este escenario representa un estanque agrícola típico del Estado de Georgia (Young, 2016, 2019). La sensibilidad del modelo a variaciones en los parámetros del cuerpo de agua no se examinará con más detalle, ya que es evidente que variaciones en el área y la profundidad de un cuerpo de agua impactarán directamente en las concentraciones de plaguicidas en agua.

1.3. Características agronómicas del cultivo de piña a escala local (variables que se emplean en el cálculo de PEC con PWC)

Las características propias del cultivo para el cálculo de PEC con PWC se obtuvieron mediante revisiones de las bases de datos, libros y literatura científica sobre el cultivo de piña y entrevistas a trabajadores. Se establecieron los valores promedio de cada parámetro para la aplicabilidad en el modelo. Las variables agronómicas de interés para esta investigación fueron:

- *Fecha de emergencia:* fecha de siembra (día en que las raíces y las hojas inician su desarrollo)
- *Fecha de madurez:* para el caso de la piña se considera hasta el día que la planta alcanza su máximo tamaño, es decir que las raíces alcanzan su máximo largo y se alcanza la cobertura máxima del dosel (en el caso del modelaje con PWC esta fecha abarca la etapa vegetativa y de inducción floral de la piña)
- *Fecha de cosecha (para el caso de la piña se considerará como fecha de derriba):* es el día cuando se remueve la planta (se considera el día cuando las raíces y la cobertura del dosel vuelve a ser cero).

- *Profundidad máxima de las raíces (cm)*: el largo máximo de las raíces (la profundidad de la raíz se usa en los cálculos de evapotranspiración y en el cálculo del riego).
- *Cobertura del dosel (%)*: porcentaje del área de la planta de la piña que cubre el suelo.
- *Altura máxima del dosel (cm)*: la altura máxima de la planta de piña en la etapa de madurez.
- *Retención de agua por las hojas del dosel (cm)*: cantidad de agua que se mantiene sobre la superficie de la cubierta vegetal (en centímetros) después de una precipitación. Este parámetro junto con la cobertura del dosel (%) determina la cantidad de agua que se puede almacenar en el dosel, sin llegar al suelo.

1.4. Selección de plaguicidas para el modelado

Para determinar cuáles moléculas cumplían con los criterios de selección, se realizó una caracterización de los datos fisicoquímicos de los insecticidas y herbicidas aprobados para el cultivo de piña en Costa Rica para agosto del 2021, según la base de datos de INSUMOSYS del Servicio Fitosanitario del Estado (SFE) (Anexo 2). Para completar la información físico química de cada ingrediente activo se extrajeron los datos disponibles en las siguientes bases de datos: Pesticide Properties Database (PPDB), Toxnet Hazardous Substances Data Bank (HSDB), Unión Europea (European Commission), Informes de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO/OMS), Registros de evaluación de la USEPA y European Food Safety Authority (EFSA).

1.4.1. Características físicas y químicas y de comportamiento ambiental.

Para realizar el modelaje con PWC, se seleccionaron dos ingredientes activos (I.A.) que presentan comportamientos de destino ambiental diferentes, con características contrastantes en términos de su solubilidad, degradación y coeficiente de distribución (kd). Además, con la finalidad de que los análisis abarquen la mayor cantidad de escenarios posibles, se eligió que cada uno de los I.A. tuviera acción biocida diferente: un herbicida y un insecticida, ya que son las dos clases de plaguicidas que se relacionan con más frecuencia a problemáticas ambientales en piñeras.

Una vez realizada la caracterización de los plaguicidas, se seleccionó el herbicida hexazinona y el insecticida diazinon para realizar los modelajes con el programa PWC, debido a que presentan comportamiento de destino ambiental diferentes (Cuadro 4).

1.4.2. Patrón de uso aprobado para los plaguicidas seleccionados

Los datos de la aplicación del plaguicida que se utilizaron en el modelo de PWC, se obtuvieron de la base de datos INSUMOSYS del SFE. Se hizo una recopilación de todos los datos aprobados para los dos plaguicidas seleccionados, con lo cual se determinó el peor escenario de aplicación para cada molécula de I.A. los datos seleccionados para el modelaje se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4. Datos del patrón de uso aprobado para cada plaguicida en cultivos de piña, empleados en el modelaje con el programa PWC.

Formas de aplicación	Hexazinona	Diazinon
Tasa de aplicación anual	1.94 L i.a./ha	28.8 L i.a/ha
Tipo de aplicación	Aspersión sobre el dosel	Aspersión sobre el dosel
Concentración del IA	75%	60%
Dosis de aplicación	2.59 L/ha.	3 a 6 L/ha
Número de aplicaciones por año	1 aplicación	8 aplicaciones
Volumen de aplicación (L/ha)	NA	1000 a 3000 L/ha
Intervalo entre aplicaciones	NA	15 días
Eficiencia de la aplicación*	0.99	0.99
Porcentaje que va a Deriva*	0.01	0.01

*: valores por defecto que indica el manual de PWC para las aspersiones dirigidas (Young, 2016).

2. Análisis de sensibilidad mediante el método de efectos elementales de Morris.

2.1. Selección de escenario base para el modelaje en el PWC.

Debido a que la interfaz del modelo PWC no incluye escenarios para cultivo de piña, se debe utilizar un escenario ya creado como “escenario base”, sobre el cual se van a realizar las

modificaciones para incluir los datos propios de un cultivo de piña de la ZNN, en resumen, se van a parametrizar los siguientes datos:

- Climáticos
- Características del suelo
- Patrón de uso de cada plaguicida
- Características agronómicas del cultivo de piña.

Para la selección del escenario base se analizó los cultivos disponibles considerando las similitudes en cuanto a sus requerimientos agronómicos básicos y características del suelo.

2.2. Diseño de estudio para los análisis de sensibilidad.

El diseño se realizó en función de la metodología establecida para análisis de sensibilidad tipo OAT, es decir en todos los modelajes las variables de condiciones climáticas, características del suelo, patrón de uso y características físico químicas de cada plaguicida seleccionado se mantuvieron constantes, variando únicamente las variables agronómicas de interés. La metodología de Morris requiere que cada variable que se analiza tenga tres posibles datos: valor inferior, valor nominal (valor real de piña) y valor superior. Para determinar estos valores, se realizó una búsqueda de todos los escenarios disponibles en el modelo para ese cultivo seleccionado con mayores similitudes, y se identificó cuál de los escenarios presenta mayor rango de diferencia tanto inferior como superior con respecto a los valores cultivo de piña y así seleccionar los valores inferiores y valores superiores que requiere el análisis de Morris como puntos de comparación.

Se utilizó el programa PWC con la versión 2.001 para calcular el PEC por medio de una serie de modelajes con el PWC para el cultivo de piña, que se realizó de manera sistemática, donde se fue cambiando un valor a la vez en cada una de las 7 variables agronómicas de interés, mientras se mantenían las demás de manera constante y se repitió este proceso para todas las variables agronómicas, de manera que se evalúen todas las posibles combinaciones. Después de completar todos los modelajes se extrajeron los resultados de PEC, para realizar el análisis de sensibilidad y así determinar cuáles variables agronómicas tienen el mayor impacto en la salida del modelo.

En cada modelaje realizado se generó un reporte, del cual se extrajo el dato de pico de la concentración ambiental estimada (PEC) en el agua 24 horas después de la aplicación (“Peak (1-day Avg (1-in-10 yr))”), dichos valores se utilizaron para aplicar al análisis de sensibilidad de Morris.

2.3. Análisis de sensibilidad en R

Una vez recopilados los datos de las PEC de cada uno de los modelajes, se realizó el análisis de Morris utilizando el lenguaje de programación R-3.0.3 (2022), y la interfaz de visualización RStudio-2022.12.0-353, mediante el paquete de sensibilidad llamado: *Sensitivity_Morris* y el paquete para creación de gráficos llamado “ggplot”. El script de la interfaz se refleja en el Anexo 3.

3. Descripción de una propuesta de parametrización para un escenario de piña en CR.

Según los resultados obtenidos, se genera una lista de los datos de:

- Las condiciones climáticas
- Características del suelo
- Patrón de uso
- Características agronómicas del cultivo de piña

Que se podrían utilizar para realizar simulaciones con el PWC, en una piñera en la ZN de Costa Rica.

Además, para determinar las diferencias en los resultados de la PEC al hacer variaciones en el cálculo de la PEC por el PWC, se realizaron las simulaciones de tres escenarios comparativos:

- El primer escenario (CR_piña) incluye todas las variables modificadas para cultivo de piña en Costa Rica (excepto las características del cuerpo de agua y los valores de erosión, lixiviación y escorrentía, que se mantienen tal como las da el modelo por defecto).

- El segundo escenario (FL_piña) se realizó manteniendo los valores de las características ambientales (suelo y clima) y de patrón de uso que por defecto incluye el escenario de papa en Florida y variando únicamente las variables agronómicas de piña en Costa Rica, que se identificaron como variables sensibles.
- El tercer escenario (FL_papa) se realizó con todas las variables que por defecto incluye el escenario de papa en Florida, sin hacer ninguna modificación.

V. RESULTADOS

1. Información recopilada de las variables de entrada que se requieren para el modelaje con PWC, para cultivo de piña en la zona norte de Costa Rica.

1.1. Selección del escenario base:

Como resultado de la búsqueda del escenario con características de suelo con mayor similitud a las de los cultivos de piña, se determinó que, de los cultivos que actualmente tienen escenarios disponibles en el PWC para su análisis en aguas, el escenario para cultivo de papa es el que presenta mayor porcentaje de similitudes en las características del suelo, con el cultivo de piña, el cual es el cultivo de interés de la investigación (cuadro 5), razón por la cual se selecciona como el “escenario base”.

Cuadro 5. Características de comparación entre el cultivo de papa considerado como escenario base y el cultivo de piña.

Características de cultivo de piña en la Zona Norte del país	*Escenario de Papa (Florida)
Área geográfica del escenario y tipo de suelo	Jacksonville, Florida (Alfisoles)
Suelo desnudo y alta luminosidad	✓
Clima cálido y húmedo	✓
Suelos sueltos, aireados y excelente drenaje	✓
Topografía del terreno plana o con ligeras pendientes	✓
pH del suelo (5 - 6)	✓
Suelos profundos	✓
Suelos con baja capacidad de retención de agua	✓

*Información extraída del escenario de FL_potato del modelo PWC (2013) y IFAS (2021).

En los archivos de PWC, se encontró que para cultivos de papa hay disponibles cinco escenarios con diferentes localidades y manejo de los cultivos: California, Florida,

Indianápolis, Maryland y Washington. Los escenarios que presentan valores con mayor rango de diferencia tanto inferior como superior con respecto a los valores del cultivo de piña fueron los escenarios de Florida (FL) y California (CA), correspondientemente (Cuadro 6). Por lo que se seleccionaron los valores agronómicos de estos escenarios como puntos de comparación para el análisis de sensibilidad. La comparación de los 5 escenarios disponibles para cultivos de papa se encuentra en el anexo 4.

1.2. Características agronómicas del cultivo de piña

Según la investigación y la recopilación de información, se determinó que los valores de las variables agronómicas propias del cultivo de piña de la ZNN del país, son las indicadas en el cuadro 6.

Cuadro 6. Valores agronómicos del cultivo de piña en la ZNN, Costa Rica empleados en el cálculo de PEC con PWC y valores agronómicos de los escenarios seleccionados como puntos de comparación inferior y superior seleccionados como punto de comparación para realizar el análisis de sensibilidad de Morris.

Variables agronómicas	Siglas	Datos agronómicos de la papa, FL	Datos agronómicos de la papa, CA	Datos agronómicos de la piña	Fuentes de información de los datos agronómicos de cultivos de piña, Costa Rica
Fecha de siembra (días)	Fe_Sm	30	76	1	MAG, 2018
Fecha de maduración (días)	Fe_Mad	121	165	252	MAG, 2018
Fecha de cosecha (días)	Fe_Cos	150	195	360	MAG, 2018

Profundidad de raíces (cm)	Pr_Rz	30	91	60	Segura, 2015
Cobertura de dosel (%)	Cob_dos	30%	100%	50%	Comunicación personal Trabajador de una piñera de la RHN
Altura dosel (cm)	Alt_dos	30	60	135	
Retención de agua (cm)	Ret_ag	0.1	0.5	0.3	Juan-Alberto et al., 2016
Follaje posterior a la cosecha		Aplicación superficial	Aplicación superficial	Permanece en el follaje	MAG, 2018
Periodo de siembra (días)		150	195	365	MAG, 2018

1.3. Condiciones climáticas

Como resultado del análisis de los datos climáticos de las 11 estaciones meteorológicas aportadas por el IMN, la estación N° 69633, ubicada en el cantón de Los Chiles, fue la base de datos con mayor antigüedad (25 años de datos) y más completa en cuanto a las mediciones diarias de cada una de las variables climáticas, por lo que estos datos fueron los que se utilizaron en el modelaje con PWC. La creación del archivo del clima se refleja en el anexo 5. El archivo de clima para la estación meteorológica de Los Chiles con formato “.wea”, se adjunta de manera digital en el anexo 6.

1.4. Características de suelo

Se determinó que los suelos de la zona norte del país, correspondientes a Upala, Guatuso, los Chiles, Sarapiquí, San Carlos, se clasifican como suelos ultisoles, según la información recopilada de la base de datos de Principales Suelos de Costa Rica del MAG (2016), Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA, 2016) y del Mapa Digital de Suelos y la Base de Datos de Perfiles de Suelos de Costa Rica del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA-UCR, 2016). Las características del perfil de suelos ultisoles de la zona Norte del país, utilizadas en las simulaciones con el PWC, se presentan en el cuadro 7.

En cuanto a las curvas de datos de escorrentía, erosión y lixiviación, se encontró que la información disponible para los suelos tipo ultisoles de la ZNN es muy escasa y desactualizada (Chinchilla et al., 2011; Rojas y Peña, 2013; INTA, 2016; Vargas, 2020; Aguirre, 2021; Clemente, 2021; CIA, 2021; Vásquez et al., 2022). Además, los datos que se encuentran disponibles no representan periodos de tiempo, sino mediciones puntuales; debido a estas razones, los datos de escorrentía y erosión fueron constantes en todas las simulaciones y se utilizaron los valores predeterminados por el escenario base del cultivo de papa de FL.

Cuadro 7. Características morfológicas y variables físicas de suelos Ultisoles, asociados a cultivos de piña convencional, Sarapiquí, Heredia, obtenidas de Aguirre, (2021).

Capas del suelo	Profundidad (cm)	Densidad aparente ¹ (g/cm ³)	Capacidad de campo ²	Marchitez permanente ³	OC (%)	N
1	0-20	1.1	50.1	30.1	2.08	22
2	20-35	1.0	55.7	39.1	2.31	25
3	35-78	0.9	63.1	44.0	2.09	23
4	78-135	1.0	73.7	56.5	1.65	19
5	135-200	0.9	73.6	55.9	0.89	13

1.5. Selección del plaguicida y patrón de uso

Se eligió realizar los modelajes con el herbicida hexazinona y el insecticida diazinon. La hexazinona se considera una molécula persistente y móvil en el suelo y en los medios acuáticos, los datos de disipación en el campo lo confirman, por lo que se considera con alto potencial de contaminar cuerpos de agua. En cuanto al insecticida diazinon, este plaguicida

¹ Densidad aparente: es la masa seca de un volumen determinado de suelo, incluyendo los espacios de poros.

² Capacidad de campo: es la cantidad máxima de agua que puede retener el suelo después de que el exceso de agua se haya drenado por gravedad.

³ Punto de marchitez: es el contenido de humedad del suelo por debajo del cual las plantas no pueden extraer agua del suelo con suficiente rapidez para satisfacer sus necesidades de transpiración.

presenta moderada solubilidad, baja lixiviación y persistencia, por lo que se considera con moderado potencial de contaminar cuerpos de agua (cuadro 8).

Cuadro 8. Valores de las propiedades fisicoquímicas recopiladas para el herbicida hexazinona y el insecticida diazinon, empleados en el modelaje con el programa PWC.

Datos propios de la molécula	hexazinona	diazinon
Coefficiente de Partición Octanol-Agua (Kow) Log Pow	54	643
Vida media en la columna de agua (días)	60	4.3
Temperatura del agua (°C)	20	20
Vida media en sedimento (días)	22	15.2
Temperatura del sedimento (°C)	30	20
Vida media por fotólisis acuosa (días)	56	50
Latitud fotólisis (°N)	40	39
Vida media por hidrólisis (días)	30	12
Vida media en el suelo (días)	90	9.1
Temperatura del suelo (°C)	20	20
Vida media foliar del plaguicida (días)	11.3	3.4
Peso molecular (g/mol)	252.31	304.35
Presión de vapor (torr)	2.70E-07	8.98E-05
Solubilidad (mg/L)	29800	60
Constante d Henry (Pa*m3/mol)	1.10E-07	0.0609

2. Modelajes y cálculos del PEC con el PWC, en un cultivo de piña en la Zona Norte, Costa Rica.

Los resultados obtenidos de los modelajes con PWC evidencian diferencias marcadas en los valores de PEC, donde para ambos plaguicidas los valores más bajos se obtuvieron en el primer escenario (Cuadro 9), es decir el escenario en el que se modificaron la mayoría de las variables con los datos propios de la ZNN y para cultivo de piña (CR_piña). Además, se

observó que al modelar un escenario con la mayoría de las variables modificadas para cultivo de piña y usar las variables agronómicas del cultivo de papa (FL_papa), la PEC varía notablemente y arroja resultados de PEC más altos en comparación al escenario 1 y notablemente menores que el PEC obtenido del tercer escenario (FL_piña).

Cuadro 9. Resultados del PEC 24 horas después de la aplicación (ppb), de tres escenarios diferentes con el herbicida hexazinona y el insecticida diazinon para cada escenario, con el modelo PWC.

Plaguicidas	PEC 24 horas (ppb)		
	CR_piña	FL_piña	FL_papa
Hexazinona	7.097	10.99	28.32
Diazinon	40.89	49.10	122.4

3. *Análisis de sensibilidad de las variables agronómicas del modelo PWC*

Se realizaron 510 simulaciones con el programa PWC, teniendo como resultado un total de 510 reportes, de los cuales 504 corresponden a los reportes que se emplearon en el análisis de sensibilidad (252 para cada plaguicida seleccionado) y 6 reportes corresponden a la comparación entre los tres escenarios posterior a los resultados del análisis de sensibilidad (CR_piña, FL_piña y FL_papa). En el anexo 7 y 8 se presenta un ejemplo del reporte generado por el programa PWC para cada plaguicida seleccionado y los 504 reportes generados se adjuntan en un archivo digital en el anexo 9.

Según los resultados del análisis de sensibilidad de Morris, de los siete parámetros analizados: fecha de emergencia, fecha de madurez, fecha de cosecha, profundidad máxima de las raíces, cobertura del dosel, altura máxima del dosel y retención de agua por las hojas del dosel, se identificaron cuatro como parámetros sensibles para ambos plaguicidas, (Fig. 8 y 9). Sin embargo, se observó que el orden de sensibilidad de los parámetros sí varía según las características fisicoquímicas de las moléculas.

Según los resultados de la variable sigma (σ) del análisis de Morris, en los modelajes con el herbicida hexazinona el orden de importancia de los parámetros fue: 1. Fecha de maduración (Fe_Mad) ($\sigma = 192.65$), 2. altura de dosel (Alt_dos) ($\sigma = 145.75$), 3. Cobertura de dosel (Co_dos) ($\sigma = 145.11$) y 4. Profundidad de raíces (Pr_Rz) ($\sigma = 104.07$) (Fig. 8).

Dichos resultados se pueden observar con mayor facilidad en el gráfico de la figura 8, en la cual se observa que estas 4 variables se ubican en el área de efectos no lineales o de interacción (Fig. 5), ya que los valores tanto de σ como de μ^* , son altos, por lo que se pueden identificar como las variables que presentan una alta importancia en los valores de la PEC resultante del PWC y una alta interacción con las otras variables agronómicas que se incluyen en el modelo.

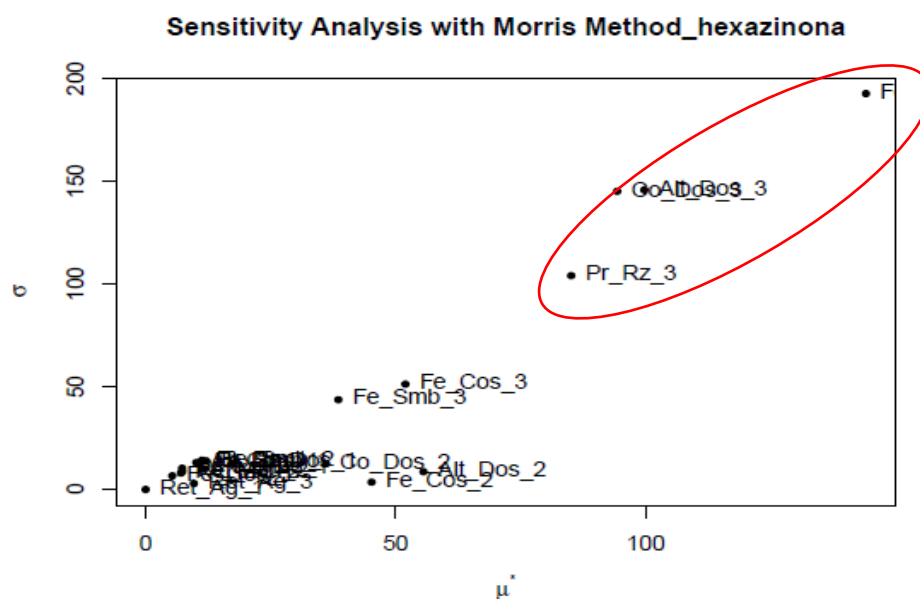


Figura 7. Representación gráfica de los resultados del análisis de sensibilidad de las variables agronómicas del modelo PWC, con el Método Morris para el herbicida hexazinona.

En cuanto a los resultados del análisis de sensibilidad, utilizando los resultados de PEC, para el insecticida diazinon, el orden de importancia según los resultados para sigma (σ) fue: 1. Cobertura del dosel (Co_dos) ($\sigma = 223.14$), 2. Fecha de maduración (Fe_Mad) ($\sigma = 213.40$),

3. Altura del dosel (Alt_dos) ($\sigma = 176.70$) y 4. Profundidad de raíces (Pr_Rz) ($\sigma = 120.05$) (Fig. 9).

En el gráfico de la figura 9, se observa que las 4 variables supra se ubican en área de efectos no lineales o de interacción (Fig. 5), por lo que se pueden identificar como variables de alta importancia en los valores de la PEC resultante del PWC y una alta interacción con las otras variables agronómicas que se incluyen en el modelo.

En ambos casos se puede observar que los valores de σ y μ de las variables de fecha de siembra, fecha de cosecha y retención de agua por las hojas, se encuentran en el área de efectos insignificantes (Fig.5). por lo que se interpreta que son variables que no generan efectos significativos en el cálculo de la PEC resultante del modelaje con la interfaz PWC con el herbicida hexazinona y el insecticida diazinon (Fig 8 y 9).

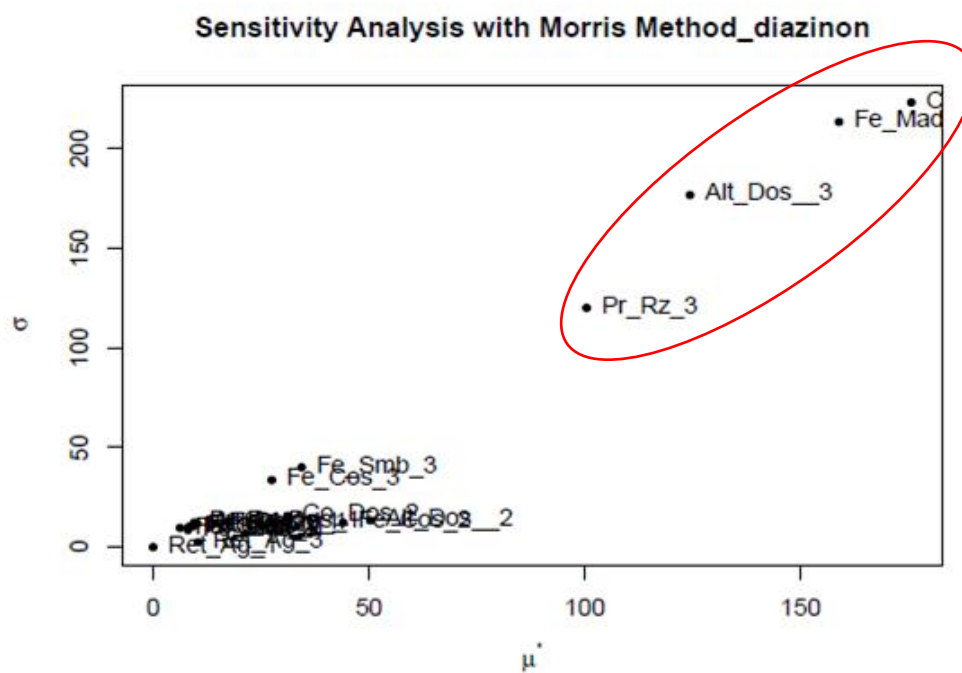


Figura 8. Representación gráfica de los resultados del análisis de sensibilidad de las variables agronómicas del modelo PWC, con el Método Morris para el insecticida diazinon.

4. Posibles valores de entrada para un escenario de exposición del modelo PWC, con mayor representatividad para un cultivo de piña en la ZNN de Costa Rica.

Como respuesta a la recopilación conjunta e integrada de los datos requeridos por el modelo PWC a excepción de las características de cuerpo de agua y datos de escorrentía y erosión, se conforma la propuesta de los posibles valores para parametrizar un escenario y realizar modelajes con cultivo de piña en la ZNN, esta propuesta se presenta en el anexo 10 y en el anexo 11 está disponible en forma digital adjunto el archivo con el posible escenario para cultivo de piña en Costa Rica

De las 97 variables que se deben parametrizar para crear un escenario nuevo en el PWC, en esta investigación se modificaron un total de 59, las cuales representan un 60.8% del total de las variables que requiere el PWC. En la figura 10, se puede visualizar de manera gráfica la cantidad de variables que requiere cada categoría y cuántas de estas se modificaron con datos de una piñera en la zona Norte de CR.

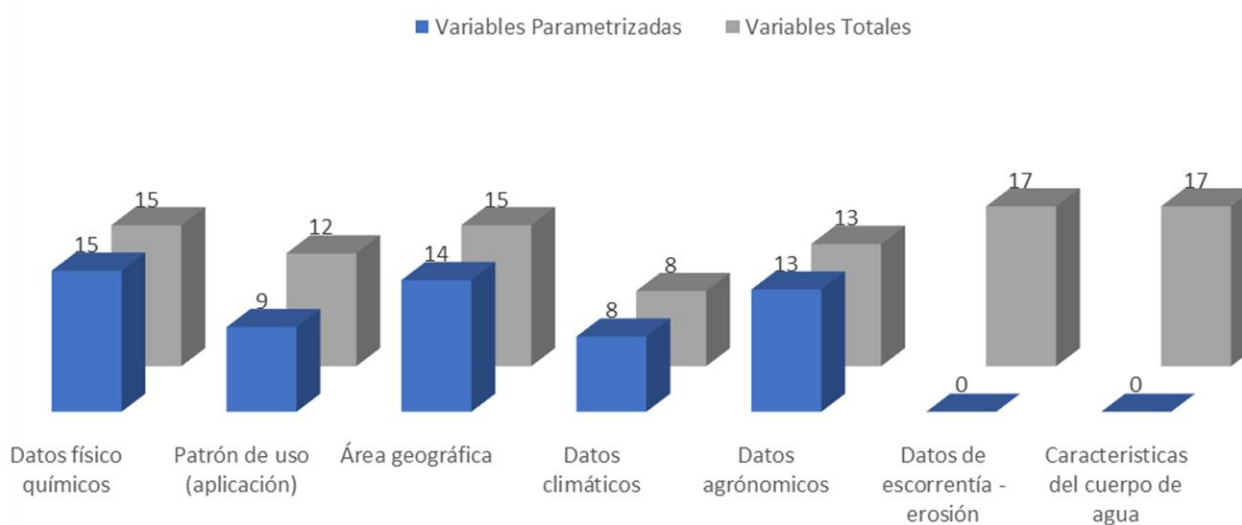


Figura 9. Representación gráfica de total de las variables y las categorías de datos que requiere el PWC para realizar el cálculo de la PEC y de las variables modificadas para el cultivo de Piña en la ZN de CR.

VI. DISCUSIÓN

1. Información recopilada de las variables de entrada que se requieren para el modelaje con PWC, para cultivo de piña en la zona norte de Costa Rica.

En Costa Rica, desde hace varias décadas, se ha llevado a cabo una extensa investigación científica sobre los cultivos de piña. Esta investigación se ha centrado principalmente en las características del suelo, los requisitos agrícolas y las condiciones climáticas, así como las características propias del cultivo. Por tanto, se podría esperar que exista una amplia cantidad de datos disponibles para las diferentes zonas del país donde se cultiva intensivamente la piña, convirtiéndola en un cultivo óptimo para buscar la parametrización de escenarios del modelo PWC. Sin embargo, durante el proceso de recopilación de información, se ha determinado que gran parte de la información generada en estas investigaciones no está disponible al público. En algunos casos, las instituciones estatales como el Servicio Fitosanitario del Estado (SFE), el Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA) y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), tienen conocimiento de la existencia de estos datos, pero debido a que son datos privados generados por las empresas productoras de piña, no se tiene acceso a ellos y se manejan como información confidencial.

Por consiguiente, a pesar de que el cultivo de piña ha sido objeto de una amplia investigación científica en Costa Rica, la falta de acceso a los datos privados generados por las empresas productoras de piña representa un obstáculo importante para la parametrización de escenarios en el modelo PWC y, por lo tanto, limita la capacidad de realizar evaluaciones de riesgo ecotoxicológicas con mayor representación de las condiciones reales del campo. Además, se identificó que existe una marcada división entre las instituciones que realizan investigación, la propia industria agrícola y las instituciones gubernamentales, situación que genera poca claridad con respecto a cuáles datos existen, pero no están disponibles al público y cuales datos no se han cuantificado por ninguna de las instituciones investigadoras.

Debido a los motivos mencionados y en sintonía con lo concluido por varios autores (Iturburu et al., 2019; D'Andrea, 2019; D'Andrea et al., 2020; Casallanovo et al., 2021; Mac-Loughlin, 2021; Villalobos-Pérez et al., 2021; De Oliveira y Vieira, 2022), la falta de acceso a

información actualizada y confiable es uno de los principales retos en la parametrización de escenarios del modelo PWC. En muchos casos, esto obliga a las personas investigadoras a recurrir a datos no actualizados o a datos de áreas y cultivos similares pero que no corresponden específicamente al área o cultivo de interés. En el caso particular de los cultivos de piña en la Zona Norte del país, y en lo relacionado a los datos de las características del cuerpo de agua que requiere el modelo PWC, se deben utilizar los datos que por defecto incluye el modelo PWC. Esto se debe a que no existe una base de datos completa a nivel regional o nacional que contemple las características físicas, químicas e hidrológicas de los diversos cuerpos de agua de Costa Rica.

En lo que respecta a los datos de escorrentía, erosión y lixiviación, dado que estos parámetros son cruciales en una plantación de piña, debido a la alta influencia que tienen en la eficacia productiva, las empresas piñeras llevan a cabo mediciones periódicas de estos parámetros. Sin embargo, estos datos no se encuentran disponibles públicamente. A pesar de que se ha encontrado una gran cantidad de investigaciones de los valores de erosión, escorrentía y lixiviación para diversos cultivos y áreas de la zona norte (Chinchilla et al., 2011; Rojas y Peña, 2013; Vargas, 2020; Aguirre, 2021; Clemente, 2021; Vásquez et al., 2022), los resultados reportados consisten en mediciones puntuales, mientras que el modelo PWC, exige la entrada de datos tomados periódicamente y que abarquen lapsos de tiempo que incluyan meses o años (Carsel et al., 1985; Young y Fry, 2014; Young 2020).

A pesar de que se han encontrado limitaciones en el uso y parametrización de escenarios en el modelo PWC, esta herramienta sigue siendo de fácil acceso y su parametrización es completamente alcanzable. La disponibilidad y el uso de datos reales y específicos es especialmente útil en áreas donde existe una alta variabilidad en las condiciones del suelo y el clima, ya que permite hacer simulaciones con datos regionales, obteniendo resultados más representativos y realistas. En el caso particular de Costa Rica, donde existe una gran diversidad de microclimas y tipos de suelos, las características fenológicas y el manejo agronómico de un mismo cultivo pueden variar drásticamente entre regiones, como ocurre con los cultivos de piña en la zona norte en comparación con la región de Talamanca. Por lo tanto, al realizar evaluaciones de riesgo ambiental bajo esas condiciones es fundamental el uso de herramientas que permitan medir la variabilidad de las predicciones considerando las

características propias de cada región, tanto en la investigación como en la toma de decisiones.

En la presente investigación se ha demostrado que la parametrización de escenarios del modelo PWC utilizando datos regionales y actualizados, es un avance significativo que permite una mayor comprensión de las interacciones de las variables y cálculos realizados por el modelo. Esta mejora en la parametrización se alinea con lo reportado por Oliveira y Vieira (2022), quienes destacan que la parametrización de escenarios del modelo PWC, se alcanza mediante pequeños avances que permitan una mayor comprensión de los alcances y limitaciones del modelo y por consiguiente un uso más eficiente de la herramienta.

2. Sensibilidad de las variables agronómicas en el cálculo del PEC, con el modelo PWC.

El cálculo de la concentración máxima esperada (PEC) con el modelo PWC varió entre los modelos que usaron el insecticida diazinon y el herbicida hexazinona. Sin embargo, ambos modelos identificaron los mismos cuatro parámetros fecha de maduración (Fe_Mad), altura de dosel (Alt_dos), cobertura de dosel (Co_dos) y profundidad de raíces (Pr_Rz), como las más influyentes. Estos resultados indican que, aunque las características físico-químicas de los plaguicidas son importantes para predecir su comportamiento, las variables agronómicas específicas de cada cultivo tienen una alta influencia en el cálculo de la PEC. Estos hallazgos coinciden con los de D'Andrea et al. (2020), quienes encontraron que la interacción entre las características físicas y químicas de las moléculas y las del suelo, agua y clima tienen un gran impacto en el comportamiento ambiental de los plaguicidas, mientras que el patrón de uso y las características agronómicas del cultivo influyen en la cantidad de plaguicida disponible en el ambiente.

En cuanto a la alta influencia de la variable “fecha de maduración”, es un resultado esperable ya que esta fecha para el caso particular del cultivo de piña abarca la etapa vegetativa y de inducción floral del cultivo de piña. Particularmente los cultivos de piña se caracterizan por tener un periodo vegetativo prolongado, el cual representa una etapa altamente vulnerable a las plagas y debido a que es durante esta etapa están en formación las raíces y las hojas, se

requiere un mayor número de aplicaciones de plaguicidas para proteger el cultivo (Segura, 2015; Abarca-Monge, 2017; González-Morales et al., 2019; Vásquez, 2022).

En particular, las plantaciones de piña en la Zona Norte de Costa Rica, presentan una alta tasa de descarga en las aplicaciones de plaguicidas, que oscilan entre 2000 y 3000 L/ha (INSUMOSYS, 2023), en comparación con otros cultivos como el banano (50 a 300 L/ha; MAG, 2017; INSUMOSYS, 2023) o la mayoría de los cultivos (200 a 400 L/ha; INSUMOSYS, 2023) dependiendo del tipo de plaguicida) importante tener en cuenta que debido al tamaño de las plantas durante la etapa vegetativa la mayoría de estas descargas se deposita sobre el suelo. Este alto nivel de descarga de aplicaciones de plaguicidas en el cultivo de piña aumenta la cantidad de plaguicida disponible en el ambiente y por ende tanto la tasa de infiltración como el arrastre del plaguicida hacia los cuerpos de agua es mayor durante esta etapa del cultivo. Debido a estas razones, es de esperarse que esta etapa del cultivo tenga más influencia en el cálculo de la PEC que la etapa de cosecha, donde las aplicaciones de plaguicidas son menores y la etapa es más corta (Segura, 2015; González-Morales et al., 2019; Vásquez, 2022). Estos resultados concuerdan con los encontrados por Gentil et al. (2020), Wang et al. (2020); De La Cruz y García-López, 2021), quienes concluyeron que el periodo de formación de las hojas y raíces en los cultivos de piña, representa la etapa del cultivo con mayor movimiento de plaguicidas fuera de los campos de cultivo, tanto por suelo como por agua y viento y que, en términos ambientales, esta es la etapa del cultivo que requiere de medidas de mitigación más eficientes y mejoradas.

Es importante destacar que la influencia del periodo de maduración en la cantidad de plaguicida disponible para moverse hacia cuerpos de agua, es un factor dependiente del patrón de uso aplicado. En el caso particular de los plaguicidas diazinon y hexazinona, y según los patrones de uso aprobados por el SFE (SFE, INSUMOSYS, 2022), ninguna de estas moléculas se aplica después de la inducción de la floración. En el caso de hexazinona, esto se debe a que no se realizan aplicaciones de herbicidas durante la formación del fruto para evitar dañar la producción. Por otro lado, el diazinon está aprobado únicamente para su uso durante la etapa vegetativa del cultivo debido a que, durante la etapa de formación del fruto, se deben utilizar moléculas que sean menos persistentes y se descompongan rápidamente. El diazinon, en cambio, es considerado un plaguicida persistente con un alto

potencial de contaminar los cuerpos de agua (ESFA, 2006). Debido a estas razones se puede entender que ambos plaguicidas estén aprobados para su uso únicamente durante la etapa vegetativa.

Por otro lado, la alta influencia de las variables de cobertura vegetal y la altura del dosel en el cálculo de la PEC del modelo PWC, se puede relacionar directamente con la capacidad de captación de las plantas. En el caso de plantaciones de piña, una vez que las plantas alcanzan la máxima área cúbica de crecimiento, se puede considerar que es un cultivo con alta cobertura del suelo, por lo que la captación total del cultivo por aplicación sobre el dosel es mayor, resultados que coinciden con lo encontrado por Garcerá et al. (2020) y Wang et al., (2020), quienes concluyeron que la cantidad y disposición del follaje pueden influir en la penetración y captación del plaguicida por las hojas de la planta de piña, por lo tanto, afectar la cantidad de plaguicida que se deposita sobre el suelo desnudo, minimizando la deriva por arrastre o infiltración hacia cuerpos de agua. En el caso de cultivos de siembra intensiva como es el caso de la piña en la Zona Norte del país, donde se siembra aproximadamente de 6 a 7 plantas de piña por metro cuadrado de plantación, el porcentaje de suelo desnudo cuando las plantas alcanzan el máximo crecimiento de la corona es muy escaso (MAG, 2018; Vásquez, 2022).

Además, para el caso de los plaguicidas que se aplican sobre el dosel utilizando el *spray boom* (equipo de aplicación de plaguicidas en las plantaciones de piña), se debe considerar, que es necesario calibrar para que las aplicaciones se realicen entre 1 y 2 metros sobre el cultivo, esta altura se define en función del crecimiento de la plantación (Wang et al., 2020; Brenes et al., 2021; Gao et al., 2021). En el caso específico de cultivos de piña de la Zona Norte del país, cuando el cultivo alcanza la altura máxima de las plantas, el equipo se calibra para realizar aplicaciones aproximadamente de 60 a 100 cm de altura sobre las plantas (Gentil et al., 2020). Al comparar estos resultados con lo reportado por Wang et al. (2018), quienes demostraron que, al realizar aplicaciones a alturas de 1, 2 y 3 metros, en una plantación de piña, la tasa de pérdida de plaguicida por arrastre de suelo o infiltración disminuyó a medida que aumentaba la altura de la aplicación, siendo la altura de 3 m la que tuvo la tasa de pérdida de plaguicida más baja. En conjunto, estos factores generan que el movimiento del plaguicida por arrastre de suelo o por lixiviación en plantas de piña, sea menor cuando el cultivo alcanza

la máxima cobertura vegetal y el máximo crecimiento de las plantas y por ende que ambas variables tengan una alta influencia en el cálculo de la PEC por el PWC.

En cuanto a la profundidad de las raíces se puede relacionar la alta influencia de esta variable en el cálculo de la PEC por el modelo PWC, ya que existe una estrecha relación entre la densidad de las raíces y la capacidad de absorción de las mismas. En el caso específico de la piña, se consideran plantas con raíces medianas, ya que al ser una planta que prefiere suelos bien drenados, necesita raíces que se extiendan a medianas profundidades en el suelo (de 45 a 60 cm), para fijarse y absorber los nutrientes adecuadamente. Zhao et al. (2021), también demostraron que las plantas de piña con raíces profundas (>60 cm) redujeron la cantidad de nutrientes y sedimentos que llegaron a los cuerpos de agua en comparación con las plantas de piña con raíces más cortas (<60 cm), además Paz-Kagan et al., (2017), observaron que las plantas con raíces poco profundas pueden ser más propensas a sufrir la erosión del suelo debido a la lluvia y los fuertes vientos. Con estos hallazgos se puede interpretar que la profundidad de las raíces en las plantas de piña juega un papel importante en la cantidad de plaguicida que puede moverse hacia cuerpos de agua cercanos o aguas subterráneas por infiltración.

La comprensión de cómo las características agronómicas de un cultivo pueden influir en la cantidad de plaguicida disponible en el ambiente es esencial para realizar predicciones precisas de las concentraciones y posibles rutas de movimiento de un plaguicida hacia cuerpos de agua. Es importante destacar que, las variables agronómicas que se identificaron como sensibles deben parametrizarse cuidadosamente, ya que, la variabilidad en los datos introducido para estas variables afecta directamente en una representatividad de los resultados de la PEC con el PWC. Es fundamental disponer siempre de la información específica y actualizada sobre estas variables en la parametrización de escenarios con el PWC.

3. Posible escenario de exposición del modelo PWC para un cultivo de piña en la ZNN de Costa Rica.

Tras recopilar todos los datos propios de un cultivo de piña en la zona norte del país y considerar cuidadosamente las variables más influyentes en los cálculos del PEC por el PWC,

en este estudio se propuso un posible escenario para los cultivos de piña de esta región. Al realizar la comparación de los resultados del PEC, utilizando el escenario base con el patrón de uso de los plaguicidas en piña y el escenario propuesto para piña en la ZNN, se evidenció que los resultados presentan grandes diferencias y se observó la tendencia a disminuir los valores de PEC a medida que se utilizan datos propios del área y cultivo de interés. Esta misma tendencia en los resultados de PEC coinciden con lo reportado por D'Andrea (2019), quien realizó pruebas de validación en un escenario parametrizado del PWC para cultivos de soya en Argentina y con lo reportado por De Oliveira y Vieira (2022), quienes realizaron pruebas de validación para un cultivo de caña de azúcar en Brasil. En ambos estudios se observó una tendencia en los valores de PEC a disminuir en función de la cantidad de datos que se modifican para sustituirlos por otros propios del área y cultivo de interés.

El escenario aquí propuesto caracteriza por primera vez un posible escenario para cultivo de piña en la ZNN del país, el cual incluye un 60.8% de parametrización de los datos y representa un avance importante para promover el uso de herramientas como el modelo matemático PWC, en las evaluaciones de riesgo en plantaciones de piña en la región norte del país. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el escenario propuesto, aunque representa un gran avance en la creación de un modelo específico para la piña, todavía presenta limitaciones y desafíos que deben abordarse para lograr una mayor precisión en los resultados del modelo. Al crear un posible escenario modificando los valores a partir de un escenario base se evidenció cuáles son los principales retos que enfrenta los investigadores en el uso de modelos predictivos para evaluaciones de riesgo.

Así mismo, se demostró que el uso de análisis de sensibilidad puede proporcionar información valiosa sobre el funcionamiento del modelo PWC y mejorar la comprensión de las interacciones de las variables. La identificación de los parámetros sensibles es fundamental para la interpretación adecuada de las concentraciones estimadas de plaguicidas en los cuerpos de agua y para la creación de escenarios más precisos y representativos.

En consecuencia, los esfuerzos de investigación deben orientarse hacia la generación de valores experimentales y de campo específicos para cada región o localidad que describan las variables identificadas en el análisis de sensibilidad. Estas investigaciones son cruciales en países como Costa Rica, donde la toma de decisiones regulatorias relacionadas con el

registro, la modificación y el uso de plaguicidas dependen en gran medida de los resultados de modelos matemáticos que permiten hacer predicciones de las concentraciones ambientales.

VII. CONCLUSIONES

Se detectó que 4 de los 7 parámetros agronómicos que requiere el modelo, son valores de entrada sensibles, por lo que se deben dirigir los esfuerzos en fortalecer y actualizar esta información para otras regiones y cultivos de Costa Rica. Además, se identificó que una de las principales limitaciones en la parametrización de escenarios es el acceso a la información que se requiere. Aunque actualmente el uso del PWC presenta algunas limitaciones, este estudio proporciona una base para su continuo desarrollo y estudio, adicionalmente permite establecer una ruta de investigación con prioridades más definidas.

La información obtenida a partir de esta investigación puede ser utilizada como línea base para realizar análisis de sensibilidad sobre las otras variables de entrada del modelo, con la finalidad de ampliar la comprensión de las interacciones inherentes del modelo y así, en un futuro, establecer escenarios específicos para Costa Rica. Es importante tener en cuenta que, para llevar a cabo estos análisis, se requiere disponer de datos de entrada más precisos, tales como mapas de suelo de mayor resolución, información actualizada sobre las características del suelo y sobre las tasas reales de aplicación de plaguicidas, así como información actualizada sobre la fenología y morfología de los cultivos representativos.

Esta estrategia resulta especialmente relevante al considerar que Costa Rica, cuenta con climas, suelos y cultivos representativos que no se encuentran incluidos en los escenarios contemplados por el PWC. En consecuencia, el desarrollo de escenarios locales es crucial para obtener resultados más realistas, que permitan abordar adecuadamente las evaluaciones de riesgo acuático y de esta manera, direccionar de manera más efectiva los futuros esfuerzos en la materia.

La parametrización de escenarios locales para Costa Rica y otros países latinoamericanos es un esfuerzo alcanzable y fundamental sin embargo es necesario invertir esfuerzos y recursos en la búsqueda e integración de información disponible, así como en la generación de datos que permitan disminuir los vacíos de información. Además, es fundamental la integración industria agrícola en el proceso de parametrización de escenarios locales, ya que este tipo de herramientas permiten hacer una predicción del comportamiento del plaguicida antes de realizar las aplicaciones, lo que permite a los productores hacer ajustes en la práctica de

aplicación de plaguicidas para reducir la cantidad de plaguicidas que podría mobilizarse hacia los cuerpos de agua y minimizando así los impactos ambientales negativos. Además, el uso de estos modelos de predicción puede ayudar a los agricultores a reducir los costos asociados con la aplicación de plaguicidas, ya que pueden optimizar la cantidad de plaguicida utilizado sin comprometer su eficacia.

En Costa Rica, la toma de decisiones regulatorias en el proceso de registro de plaguicidas se basa en evaluaciones de riesgo ambiental que requieren la estimación de la concentración de los plaguicidas en cuerpos de agua utilizando modelos matemáticos similares al PWC. Debido a la ventaja que presenta el modelo PWC al ser una herramienta altamente parametrizable a las condiciones de los diferentes cultivos y regiones de Costa Rica, este tipo de investigaciones permiten realizar avances importantes en la comprensión de este modelo, así como en la identificación de las ventajas y las limitantes que implica el uso del PWC para realizar ERA. Además, tener una comprensión más amplia de estos modelos es fundamental para tener más opciones de herramientas y así poder generar comparaciones entre los resultados de las modelos y las concentraciones reales que permitan identificar cual o cuales modelos presenta mayores ventajas, más precisión y mayor confianza para la toma de decisiones y como consecuencia mejorar el proceso de registro de plaguicidas y garantizar la protección ambiental en Costa Rica.

VIII. RECOMENDACIONES

- Mejorar la parametrización del modelo, probando métodos similares de análisis de sensibilidad y vulnerabilidad en otras regiones con cultivo de piña.
- Invertir esfuerzos en generar perfiles de diferentes tipos de suelo en varias regiones del país, ya que las características de los mismos, pueden variar dependiendo de la zona y el uso de suelo.
- Invertir esfuerzos en generar e integrar datos sobre la fenología y morfología de los cultivos más representativos en Costa Rica.
- Invertir esfuerzos en generar información sobre las características morfológicas de los diferentes tipos de cuerpos de agua asociados a las zonas agrícolas del país.
- Realizar comparaciones entre los resultados del modelo con los datos locales y las concentraciones reales en el ambiente, para determinar la eficacia del modelo como una posible herramienta en la toma de decisiones regulatorias.
- Promover la colaboración y el intercambio de información entre los países de la región para fortalecer el conocimiento y la aplicación de los modelos de predicción.
- Promover la colaboración y el intercambio de información entre la industria agrícola, las autoridades reguladoras y las instituciones académicas y /o de investigación y así generar una mayor integración de los datos e identificar los vacíos de información.
- Generar un equipo de trabajo multidisciplinario y dedicado a la comprensión del modelo, recopilación de información y la generación de escenarios propios para Costa Rica.
- Establecer y fortalecer las capacidades técnicas en el uso de modelos de predicción y en la interpretación de los resultados.

- Identificar los escenarios del modelo que se ajustan de manera más cercana a los cultivos de Costa Rica, para ser utilizados como línea base en el ajuste y parametrización de los mismos y tener resultados más precisos.
- Integrar otros modelos de predicción que sean más flexibles en los procesos de evaluación de riesgos de los plaguicidas y en la toma de decisiones en la gestión de riesgos.
- Incentivar y apoyar la investigación y el desarrollo de modelos de predicción para mejorar su precisión y eficacia en la evaluación de riesgos de los plaguicidas.

IX. REFERENCIAS

- Abarca-Monge, S. P. (2017). Evaluación del sistema de riego por aspersión de cultivo de piña (*Ananas comosus*) en Banacol, sección Finca Sardinal, Puntarenas. [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9880>
- Adriaanse, P.I., M.M.S. Ter Horst, B.M. Teklu, J.W. Deneer, A. Woldeamanuel and J.J.T.I. Boesten. (2015). Development of scenarios for drinking water produced from groundwater and surface water for use in the pesticide registration procedure of Ethiopia. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra report 2674. 310 pp. https://www.researchgate.net/publication/283405975_Development_of_scenarios_for_drinking_water_produced_from_groundwater_and_surface_water_for_use_in_the_pesticide_registration_procedure_of_Ethiopia
- Aguirre Elizondo, R. C. (2021). Calidad de suelos y reservorios de carbono de los suelos asociados a dos manejos de piña (orgánico y convencional) y una zona de bosque secundario en La Virgen de Sarapiquí, Heredia. [Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica]. Recuperado de <https://hdl.handle.net/10669/85516>
- Alfaro-Vives, O. G., & Mas-Diego, S. M. (2022). Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo Pro-Alga para la simulación del crecimiento de *Chlorella vulgaris*. *Tecnología Química*, 42(1), 40-55. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v42n1/2224-6185-rtq-42-01-40.pdf>
- Barrientos, O. & Chaves, G. (2008). Región Huetar Norte: oferta exportada actual y oferta potencial de productos agropecuarios alternativos (No. E71/10543). (PROCOMER) Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica, San Jos, (Costa Rica).
- Brenes, S. C., Murillo, J. H., & Cordero, W. P. (2021). Emisiones de gases efecto invernadero (GEI) derivadas de dos tipos de fertilización del cultivo de piña (*Ananas comosus*) en ultisoles de Sarapiquí, Costa Rica tomando como referencia el bosque secundario. *Perspectivas Rurales Nueva Época*, 19(37), 44-68.

<https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/perspectivasrurales/article/view/16125/2322>

2

- Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña (CANAPEP). 2021. Estadísticas. (en línea). Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña. Consultado 12/02/2023. <https://canapep.com/estadisticas/>
- Cambien, N., Gobeyn, S., Nolivos, I., Forio, M. A. E., Arias-Hidalgo, M., Dominguez-Granda, L., Witing, F., Volk, M. & Goethals, P. L. (2020). Using the soil and water assessment tool to simulate the pesticide dynamics in the data scarce Guayas River basin, Ecuador. *Water*, 12(3), 696. <https://doi.org/10.3390/w12030696>
- Campolongo, F., Cariboni, J., & Saltelli, A. (2007). An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental modelling & software*, 22(10), 1509-1518. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.10.004>
- Campos, A. O. (2020). Acciones y omisiones del Estado costarricense en la expansión piñera: el caso de la Zona Norte-Norte de Costa Rica. *Anuario Centro de Investigación y Estudios Políticos*, (11), 22-55. Recuperado de <https://doi.org/10.15517/aciep.v0i11.42226>.
- Carrquiriborde, P., Mirabella, P., Waichman, A., Solomon, K., Van den Brink, P., & Maund, S. (2014). Aquatic Risk Assessment of Pesticides in Latin America. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 10(4), 539-542. First published: 17 July 2014 <https://doi.org/10.1002/ieam.1561>
- Carsel, R. F., Mulkey, L. A., Lorber, M. N., & Baskin, L. B. (1985). The pesticide root zone model (PRZM): A procedure for evaluating pesticide leaching threats to groundwater. *Ecological Modelling*, 30(1-2), 49-69. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(85\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0304-3800(85)90036-5)
- Casallanovo, F., Simone, D. M., Santos, G. S., de Oliveira Kaminski, T. S., Cione, A. P., & Peranginangin, N. (2021). Estimating pesticide environmental concentrations in Latin America: The importance of developing local scenarios. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 17(5), 901-904. <https://doi.org/10.1002/ieam.4396>

- Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA-UCR). (2016). Mapa de Suelos de Costa Rica. En línea. Consultada 02/02/2023. <http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costa-rica>
- Chen, K. H., & Chen, S. H. (2022). Applying an artificial intelligence model using multidimensional spatial-temporal data to predict arsenic contamination of groundwater. *Process Safety and Environmental Protection*, 163, 362-367. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.030>
- Cheng, Y., Zhou, J., Liao, J., Mao, D., Chen, W., & Shan, Z. (2020). Coupled modeling using PRZM/RICEWQ and SWAT for the North Tiaoxi Watershed. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 12635-12645. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06418-x>
- Chinchilla, M., Mata, R., & Alvarado, A. (2011). Caracterización y clasificación de algunos Ultisoles de la región de Los Santos, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 35(1), 59-81.
- Chiunti, M. Á. R., & Gamboa, A. V. (2021). Diseño de un sistema de riego solar fotovoltaico para la evaluación de la fenología en chile jalapeño. *Renewable Energy, Biomass & Sustainability (REB&S)*, 3 (2), 75-83. https://aldeser.org/uploads/1/3/0/8/130818527/a10_v3n2_reb_s.pdf
- Clemente, A. L. (2021). Calidad de suelos y reservorios de carbono de los suelos asociados a dos manejos de piña (orgánico y convencional) y una zona de bosque secundario en la Virgen de Sarapiquí, Heredia. [Tesis de Maestría, Universidad de Costa Rica] recuperada de https://kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/85516/Tesis_maestr%c3%ada.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Concha-Ramírez, C. M. (2021). Estudio del comportamiento ambiental de plaguicidas usados en chile mediante estimaciones computacionales. Informe de Aprobación Seminario. Universidad de Chile. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181948>

- Contraloría General de la República (CGR). (2004). INFORME No. FOE-AM-19/2004. San José, Costa Rica: Contraloría General de la República.
- D'Andrea, M. F. (2019). Evaluación del riesgo asociado al uso de plaguicidas empleados en cultivos extensivos sobre la biota de los cuerpos de agua de la región pampeana. [Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Argentina]. Recuperada de https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n6903_Dandrea.pdf
- D'Andrea, M. F., Letourneau, G., Rousseau, AN. & Brodeur, JC. (2020). Sensitivity analysis of the Pesticide in Water Calculator model for applications in the Pampa region of Argentina. *Sci Total Environ.* 1; 698:134232. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134232
- De La Cruz, R. G., & García-López, E. (2021). Combined effects of cover crops and herbicide rotation as proactive weed management in pineapple (*Ananas comosus* L. Merr) in Huimanguillo Tabasco, Mexico. *Agro Productividad.* <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i9.2038>
- De Oliveira Kaminski, T. S., & Vieira, E. (2022). Parameterization of a Brazilian scenario in the USEPA Pesticide in Water Calculator tool to estimate the environmental exposure of pesticide in surface waters. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18(5), 1387-1398. <https://doi.org/10.1002/ieam.4567>
- Decreto Ejecutivo N° 33495-MAG-MINAE-MEIC. (2007). Reglamento sobre Registro, Uso y Control de Plaguicidas Sintéticos Formulados, Ingrediente Activo Grado Técnico, Coadyuvantes y Sustancias Afines de Uso Agrícola. Diario Oficial La Gaceta.
- DIGECA. (2019). Procedimiento general y lineamientos a seguir por parte del MINAE para la evaluación de riesgo ambiental de plaguicidas sintéticos formulados. Recuperado de Procedimiento para ERA (digecca.go.cr)
- Echeverría-Sáenz, S., Mena, F., Pinnock, M., Ruepert, C., Solano, K., De la Cruz, E., Campos, B, Sanchez, J, Lacorte S. & Barata, C. (2012). Environmental hazards of pesticides from pineapple crop production in the Río Jiménez watershed (Caribbean

- Coast, Costa Rica). *Science of the Total Environment*, 440, 106-114.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.092>
- European Food Safety Authority (EFSA). (2006). Conclusion regarding the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance diazinon. *EFSA Scientific Report* 85, 1-73. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2006.85r_diazinon
- Focks, A., ter Horst, M., van den Berg, E., Baveco, H., & van den Brink, P. J. (2014). Integrating chemical fate and population-level effect models for pesticides at landscape scale: New options for risk assessment. *Ecological modelling*, 280, 102-116.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.09.023>
- Franczyk, A. (2019). Using the Morris sensitivity analysis method to assess the importance of input variables on time-reversal imaging of seismic sources. *Acta Geophys.* 67, 1525–1533. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00356-5>
- Fry, M., Milians, K., Young, D. & Zhong, H. (2014). Surface Water Concentration Calculator User Manual USEPA/OPP 734F14001 Installation and Launching 1–21. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Fry, MM., Rothman, G., Young, DF. & Thurman, N. (2016). Daily gridded weather for pesticide exposure modeling. *Environmental Modelling & Software.* 82, 167-173.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.008>
- Gali, R. K., Cryer, S. A., Poletika, N. N., & Dande, P. K. (2020). Modeling Pesticide Runoff from Small Watersheds Through Field-Scale Management Practices: Minnesota Watershed Case Study with Chlorpyrifos. *Air, Soil and Water Research*, 9(1).
<https://doi.org/10.4137/ASWR.S32777>
- Gao, L., & Bryan, B. A. (2016). Incorporating deep uncertainty into the elementary effects method for robust global sensitivity analysis. *Ecological modelling*, 321, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.10.016>

- Gao, X., Li, Y., Xie, X., Li, X., & Ma, X. (2021). Effects of canopy density and nozzle type on spray deposition and drift for orchard pesticide application. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 176, 104877.
- Garcerá, C., Fonte, A., Salcedo, R., Soler, A., & Chueca, P. (2020). Dose expression for pesticide application in citrus: Influence of canopy size and sprayer. *Agronomy*, 10(12), 1887. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121887>
- Gentil, C., Fantke, P., Mottes, C., & Basset-Mens, C. (2020). Challenges and ways forward in pesticide emission and toxicity characterization modeling for tropical conditions. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 1290-1306. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01685-9>
- Gómez-Cruz, A. M., Gutiérrez-Miceli, F. A., Dendooven, L., & Ruiz-Valdiviezo, V. M. (2019). Assessment of pesticide residues in agricultural soils of Mexico: A review. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 54(7), 527-538. <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1612386>
- González-Morales, S., Acuña-Rodríguez, I. S., Cárdenas-Valenzuela, O. G., & Ruiz-Sánchez, E. (2019). Evaluación de la persistencia de plaguicidas en diferentes etapas fenológicas de la piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(3), 489-501. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/issue/view/4122>
- Goumenou, M., Renieri, E. A., Petrakis, D., Nathanail, A. V., Kokaraki, V., & Tsatsakis, A. (2021). Methods for environmental monitoring of pesticide exposure. In *Exposure and Risk Assessment of Pesticide Use in Agriculture* (pp. 347-387). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812466-6.00013-0>
- Holvoet, K., Seuntjens, P., & Vanrolleghem, P. (2007). Monitoring and modeling pesticide fate in surface waters at the catchment scale. *Ecological Modelling*, 209, 53-64. http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/art_revistas/pr.6880/pr.6880.pdf

- Instituto de Desarrollo Rural (INDER). (2021). Censo Nacional Agropecuario 2019. Recuperado el 17 de febrero de 2023, de <https://www.idr.go.cr/censo-nacional-agropecuario-2019>
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). (2016). Suelos de Costa Rica, orden ultisol. Boletín técnico N° 1. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1604.PDF>.
- INSUMOSYS. Consulta en línea de los productos agroquímicos registrados, autorizados según cultivo o ingrediente activo. Servicio Fitosanitario del Estado, Ministerio de Agricultura y Ganadería. Consultado 28 de abril del 2023.
- Iooss, B. & Lemaître, P. (2014). A review on global sensitivity analysis methods, en: Uncertainty management in simulation-optimization of complex systems. Boston, MA.: Springer, 101–122. DOI: 10.1007/978-1-4899-7547-8_5
- Iturburu, F. G., Calderon, G., Amé, M. V., & Menone, M. L. (2019). Ecological Risk Assessment (ERA) of pesticides from freshwater ecosystems in the Pampas region of Argentina: Legacy and current use chemicals contribution. *Science of The Total Environment*, 691, 476-482. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.044>
- Juan-Alberto, M. D., López-Cruz, I. L., Silva-Martínez, R., González-Hernández, V. A., García-Ávila, C. D., & Rodríguez-González, M. T. (2016). Pesticide retention in pineapple (*Ananas comosus* L. Merr) foliage: implications for management and environmental safety. *Agricultural Water Management*, 171, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.011>
- Kienzler, A., Bopp, S.K., van der Linden, S., Berggren, E. & Worth, A. (2016). Regulatory assessment of chemical mixtures: Requirements, current approaches and future perspectives. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 80, 321–334. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2016.05.020>
- Lora-Tamayo, C., Fuentes-Pérez, J. F., Martínez-Carballo, E., & Simal-Gándara, J. (2020). Use of the Pesticide Water Calculator to assess the risk of water contamination by

pesticides in Colombia. *Science of The Total Environment*, 719, 137453. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137453>

Luo, Y., Deng, X., Xie, Y., Singhasemanon, N., & Goh, K. S. (2019). Improved modeling approaches for pesticide registration evaluation for surface water protection in California. In *Pesticides in Surface Water: Monitoring, Modeling, Risk Assessment, and Management* (pp. 259-273). American Chemical Society. DOI: 10.1021/bk-2019-1308.ch013

Mac-Loughlin, T. M. (2021). Distribución de plaguicidas y sus efectos ecotoxicológicos en sistemas acuáticos [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Argentina]. Recuperada de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/126099>

Marrel, A., Ickowicz, A., & Gineste, C. (2009). Morris one-at-a-time sensitivity analysis: application to ecological models. *Environmental Modelling & Software*, 24(3), 357-363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.017>

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2014). Piña. Consultado en fecha 27 de diciembre del 2022. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658pina.pdf>

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2016). Principales suelos de Costa Rica. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/soils/principales-suelos-de-costa-rica>

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2018). Caracterización y plan de acción para el desarrollo de la agrocadena de Piña en la región Huetar Norte. En línea. Consultado 15/02/2023. <http://www.mag.go.cr/buscador/Default.aspx>

Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG]. (2017). FICHA TÉCNICA CULTIVO DE BANANO. Recuperado el 27 de abril de 2023, de <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8205.pdf>

- Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG]. (2021). Programa de Sanidad Vegetal: Piña. Recuperado el 17 de febrero de 2023, de <https://www.mag.go.cr/sanidadvegetal/Paginas/Pina.aspx>
- Ministerio de Comercio Exterior [COMEX]. (2020). Sector piña en Costa Rica. Recuperado el 17 de febrero de 2023, de <https://www.comex.go.cr/wp-content/uploads/2020/05/Sector-Pina-en-Costa-Rica-Mayo-2020.pdf>
- Montgomery, D. R., Barrows, E. S., Booth, D. B., Burge, D. R., Welsh, S., & Voss, F. D. (2020). Estimating pesticide concentrations in streams of northeastern Puerto Rico using land cover, soils, and human activity metrics. *Science of the Total Environment*, 705, 135871. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135871>
- Morris, M.D. (1991). Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, 33(2), 161-174.
- Obando, E. E. B. (2020). Cultivo de piña y conflictos socio-ambientales en la región Atlántico/Caribe, Costa Rica, 1990-2017. *Athenea Digital. Revista de pensamiento e investigación social*, 20(3). <https://doi.org/10.5565/rev/athenea.2421>
- Paleari, L., Movedi, E., Zoli, M., Burato, A., Cecconi, I., Errahouly, J., Eleonora P., Sorvillo C. & Confalonieri, R. (2021). Sensitivity analysis using Morris: Just screening or an effective ranking method?. *Ecological Modelling*, 455, 109648. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109648>
- Paz-Kagan, T., Martinez, M. A., Seethepalli, A., & Wang, J. (2017). The effect of root depth on the efficacy of soil-applied herbicides. *Pest management science*, 73(7), 1439-1447. <https://doi.org/10.2136/sssabookser2.c11>
- Pérez-Brito, D., Santillán-Sarmiento, A., González-Mille, D. J., Zárate, M. Á., Yáñez, L., & Gutiérrez-Coronado, O. (2021). Pesticide pollution and risk assessment in groundwater sources of the Yucatán Peninsula, Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(1), 467-483. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00629-w>

- Pérez-Indoval, R., Rodrigo-Ilarri, J., Cassiraga, E., & Rodrigo-Clavero, M. E. (2021). Numerical modeling of groundwater pollution by chlorpyrifos, bromacil and terbuthylazine. Application to the buñol-cheste aquifer (spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7), 3511. <https://doi.org/10.3390/ijerph18073511>
- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J.W., Rougier, J., Stephenson, D.B. & Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*. 79, 214–232. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>
- Rojas, M. Á. & Peña, Wagner. (2013). Estimación de niveles erosivos en suelos con cultivo de piña en Sarapiquí. *Repertorio Científico*, 16(1). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/339516470_Estimacion_de_niveles_erosivos_en_suelos_con_cultivo_de_pina_en_Sarapiqui
- Rupa-Matysek, J., Lembicz, M., Rogowska, E. K., Gil, L., Komarnicki, M., & Batura-Gabryel, H. (2018). Evaluation of risk factors and assessment models for predicting venous thromboembolism in lung cancer patients. *Medical oncology*, 35(5), 63. DOI: 10.1007/s12032-018-1120-9
- Saltelli, A. (2004). *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models*. John Wiley & Sons. www.andreasaltelli.eu/file/repository/SA_Andrea_September2020.pdf
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470725184.ch1>
- Sánchez, G. M. (2019). La piñera nos contaminó el agua: Mujer, trabajo y vida cotidiana en comunidades afectadas por la expansión piñera en Costa Rica. *Revista Latino-Americana de Geografía e Genero*, 10(2), 3-23. <https://hdl.handle.net/10669/82478>

- Sarrazin, F., Pianosi, F. & Wagener, T. (2016). Global Sensitivity Analysis of environmental models: Convergence and validation. *Environ. Model. Softw.* 79, 135–152. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.005>
- Secretaría Ejecutiva De Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA) (2023). Desempeño del Sector Agropecuario del 2022. Recuperado de http://www.sepsa.go.cr/docs/2023-005-Desempenno_SectorAgro_2022.pdf
- Segura, M. A. M. (2015). Uso de agroquímicos en la producción intensiva de piña en Costa Rica. *Pensamiento Actual*, 15(25), 183-195. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/pensamiento-actual/article/view/22604/24028>
- Sinnathamby, S., Denton, D., Oliver, L., Raimondo, S., Pitchford, A., Waits, E., & Purucker, T. (2018). Sensitivity analysis for pesticide transport in a vernal pool watershed using the Pesticide Water Calculator. <https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4170&context=iemssconference>
- Sinnathamby, S., Minucci, J. M., Denton, D. L., Raimondo, S. M., Oliver, L., Yuan, Y., Young, D., Hook, J, Pitchford, M., Waits, E. & Purucker, S. T. (2020). A sensitivity analysis of pesticide concentrations in California Central Valley vernal pools. *Environmental Pollution*, 257, 113486. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113486>
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2022). Conducting ecological risk assessment. Recuperado de <https://www.epa.gov/risk/conducting-ecological-risk-assessment> (accedido el 6 de febrero del 2023).
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2020. Models for pesticide risk assessment. Washington (DC). About Pesticide Registration | US EPA. consultada 12 de febrero del 2023. <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/models-pesticide-risk-assessment>

- University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS). (2021) Vegetable Nutrient Management by crop (en línea). Consultada 30/04/2023. https://edis.ifas.ufl.edu/entity/topic/spa_potato
- Valenzuela, C. M., Casas, G. R., Berrelleza, A. A. C., & Martínez, L. D. O. (2020). Plaguicidas, impacto en salud y medio ambiente en Sinaloa (México): implicaciones y retos en gobernanza ambiental. *Pesticides, Health and Environment Impact*. 23 (47), 77-91. <https://doi.org/10.22430/22565337.1404>
- Vargas Arias, K. (2020). Estimación y distribución espacial de las tasas de erosión y acumulación del suelo mediante el trazador radioisotópico ^{137}Cs en la microcuenca del río San Lorencito, San Ramón, Costa Rica. 2017-2018. [tesis de licenciatura Universidad de Costa Rica]. Recuperado de <http://repo.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/18026/1/45905.pdf>
- Vásquez Amariles, H, Saavedra Ospina, R, Guerrero Cobos, D, Quintero Jiménez, M y Canacuan Colima, J. (2022). Opciones tecnológicas para mejorar las prácticas agronómicas en el cultivo de piña MD2 en zona de ladera, Colombia: Parcela demostrativa de piña md2 establecida en zona de ladera. Universidad Nacional de Colombia. Editorial Universidad Nacional de Colombia, 2022. 94 páginas.
- Vera Acosta, J. J. (2022). Impacto del uso de los drones para realizar aspersiones en plantaciones de maíz (*Zea mays*) [Tesis, Universidad Técnica De Babahoyo, Ecuador]. Recurada de <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13290>
- Villalobos-Pérez, J. D., Vargas-Vázquez, D., Ramírez-Vargas, M., & Barrera-Cortés, J. (2021). Adaptation of the Pesticide Water Calculator for assessing pesticide risks in the upper basin of the Papaloapan river, Mexico. *Science of The Total Environment*, 778, 146288. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146288>
- Vryzas, Z., Ramwell, C., & Sans, C. (2020). Pesticide prioritization approaches and limitations in environmental monitoring studies: from Europe to Latin America and the Caribbean. *Environment International*, 143, 105917. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105917>

- Wang, C., Peng, M., & Xia, G. (2020). Sensitivity analysis based on Morris method of passive system performance under ocean conditions. *Annals of Nuclear Energy*, 137, 107067. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107067>
- Wang, J., Lan, Y., Wen, S., Hewitt, A. J., Yao, W., & Chen, P. (2020). Meteorological and flight altitude effects on deposition, penetration, and drift in pineapple aerial spraying. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15(1), e2382. <https://doi.org/10.1002/apj.2382>
- Wang, J., Lan, Y., Zhang, H., Zhang, Y., Wen, S., Yao, W., & Deng, J. (2018). Drift and deposition of pesticide applied by UAV on pineapple plants under different meteorological conditions. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(6), 5-12. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181106.4038
- Wolt, J., Singh, P., Cryer, S., & Lin, J. (2002). Sensitivity analysis for validating expert opinion as to ideal data set criteria for transport modeling. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 21(8), 1558-1565. <https://doi.org/10.1002/etc.5620210805>
- Xie, Y., Luo, Y., Singhasemanon, N., & Goh, K. S. (2018). Regulatory Modeling of Pesticide Aquatic Exposures in California's Agricultural Receiving Waters. *Journal of Environmental Quality*, 47(6), 1453-1461. <https://doi:10.2134/jeq2018.05.0198>
- Young DF, Fry MM. (2020). PRZM5: A model for predicting pesticides in runoff, erosion, and leachate. Revision B. Washington (DC): United States Environmental Protection Agency. 55 p. https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-11/pwc_2.001.zip
- Young, D. (2015). Pesticide in Water Calculator user manual (version 1.52). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/pesticide-water-calculator-version-150-user-manual>
- Young, D. F. (2016). The Variable Volume Water Model Revision A. Environmental Fate and Effects Division, Office of Pesticide Programs, US Environmental Protection

Agency, 36.
https://www.researchgate.net/publication/270565226_The_Variable_Volume_Water_Model

Young, D. F. (2019). US Environmental Protection Agency Model for Estimating Pesticides in Surface Water. In *Pesticides in Surface Water: Monitoring, Modeling, Risk Assessment, and Management*. American Chemical Society, 309-331.

Young, D.F. & Fry, M.M. (2014). PRZM5 A Model for Predicting Pesticide in Runoff, Erosion, and Leachate: User Manual USEPA/OPP 734F14002. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-3026-x>

Zhao, M., Zhao, J., Yuan, J., Hale, L., Wen, T., Huang, Vivancio, J., Zhou, J., Kowalchuk, G. & Shen, Q. (2021). Root exudates drive soil-microbe-nutrient feedbacks in response to plant growth. *Plant, Cell & Environment*, 44(2), 613-628. <https://doi.org/10.1111/pce.13928>

Zhu, H., Zhang, J., Zhu, J., Li, Q., & Dong, F. (2019). Effects of plant canopy structure on pesticide droplet deposition and drift. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 54(5), 359-365.

X. ANEXOS

Anexo 1. Categorías y variables de entrada que requiere el modelo PWC para realizar el cálculo de la PEC.

Categoría	Variable de entrada
Características físico químicas	Coeficiente de partición octanol-agua (kow) log pow
	Vida media en la columna de agua (días)
	Temperatura del agua (°C)
	Vida media en sedimento (días)
	Temperatura del sedimento (°C)
	Vida media por fotólisis acuosa (días)
	Latitud fotólisis (°N)
	Vida media por hidrólisis (días)
	Vida media en el suelo (días)
	Temperatura del suelo (°C)
	Vida media foliar del plaguicida (días)
	Peso molecular (g/mol)
	Presión de vapor (Torr)
	Solubilidad (mg/l)
Constante de Henry (Pa*m ³ /mol)	
Aplicaciones	Número de aplicaciones por año
	Datos de aplicación absolutos o relativos
	Periodo del cultivo
	Año específico (opcional)
	Fecha de aplicación (días)
	Año de las aplicaciones (opcional solo si se especifica el año)
	Dosis de aplicación (kg/ha) (l/ha)
	Tipo de aplicación (foliar/suelo/incorporada)
	En caso de ser incorporada se debe agregar profundidad, sobre línea de suelo/ debajo de línea de suelo y banda-t)
	Eficiencia de la aplicación*
	Porcentaje que va a deriva*
Estanque, embalse, personalizado	
Área geográfica	Escenario
	Archivo de clima
	Coeficiente de evapotranspiración (constante 0.7)
	Factor de fusión de nieve (cm/°C/día)
	Profundidad de evapotranspiración (cm)

	Agua del cultivo: fracción de agua adicional, agotamiento permitido, tasa máxima de suministro
	Latitud (N°)
	Espesor de la capa límite (0.5 cm) constante
	Numero de horizontes del suelo
	Grosor de las capas
	Porosidad efectiva (g/cm ³)
	Capacidad de campo en el horizonte
	Punto de marchitez en el horizonte
	% carbono orgánico en el horizonte (OC.)
	Nitrógeno (N)
Clima	Mes – día – año
	Precipitación (cm/d)
	Evapotranspiración diaria (cm/d)
	Temperatura (°C)
	Velocidad del viento (cm/s)
	Radiación solar (Ia/d)
Cultivo	Ciclos de cultivo menor o mayor a un año
	Cantidad de ciclos por año
	Cronograma simple o complejo
	Fecha de siembra (día/mes)
	Fecha de maduración (día/mes)
	Fecha de cosecha (día/mes)
	Profundidad de raíces (cm)
	Cobertura de dosel (%)
	Altura dosel (cm)
	Retención de agua por las hojas (cm)
	Follaje postcosecha: superficie, se elimina la planta, se deja la planta
	Periodos de plantaciones por año
	Retraso desde la cosecha (en caso que sea más de una cosecha al año)

Anexo 2. Propiedades físicas y químicas de los insecticidas y herbicidas aprobados para su uso en cultivo de Piña (*Ananas comosus*) en Costa Rica.

Clase	IA	MM (g/mol)	P _{vapor} (Pa)	C _{Henry} (Pa*m ³ /mol)	Sol _A (mg/l)	Koc/K _{foc} (ml/g)	Co _C a (log Pow)	DT _{50_sis} t (días)	DT _{50_A} g (días)	DT _{50_se} d (días)	DT _{50_S} u (días)	DT _{50_F} t (días)	DT _{50_H} d (días)	DT _{50_F} l (días)
Herbicida	Hexazinone	252.31	3.00E-05	1.10E-07	33000	54	>3	-	60	-	90	56	56	11.3
	Bentazone	240.3	1.70E-01	7,20x10 ⁻⁵	7112.	30.2	-0.46	242	242	242	20.1	4	estable	-
	Atrazine	215.68	3.90E-05	1.50E-04	35.00	100	2.7	80	-	-	75	2.6	86	-
	Ametryn	227.12	3.65E-04	4,10x10 ⁻⁴	200.0	316	2.63	ND	-	-	60	-	368	-
	Diuron	233.09	1.15E-06	2.00E-06	35.60	813.0	2.87	48	8.8	ND	146.6	43	estable	60
	Bispyribac-sodium	452.36	5.50E-03	3.12 E-11	64000	272.0	-1.03	35.3	32.1	-	12.8	42	18.7	-
	2,4-D	221	2.30E-05	4.00E-06	24300	39.3	-0.82	18.6	7.7	9.8	94.6	90	estable	12.7
	Bensulfuron	396.38	2.80E-06	-	67.00	315.0	0.79	59	52	16	26.2	89	-	-
	Glyphosate	169.1	1.31E+01	2.10E-08	10500	15844.0	-3.2	67.74	67.74	67.74	20.51	69	estable	10
	Terbutryn	241.36	1.30E+02	1.50E-03	25.00	2432.0	3.66	60	27	-	74	0.5	estable	-
	Fluazifop-P-butyl	383.36	1.20E+02	0.049	0.93	3394.0	4.5	0.1	0.1	1000	2.9	6	78	-
Oxyfluorfen	361.7	2.60E-05	2.38E-02	0.12	5657.0	4.86	29.2	-	-	138	5.6	estable	1.6	

Clase	IA	MM (g/mol)	P_vapor (Pa)	C_Henry (Pa*m3/mol)	Sol_A (mg/l)	Koc/Kfoc (ml/g)	Co_C a (log Pow)	DT50_sis t (días)	DT50_A g (días)	DT50_se d (días)	DT50_S u (días)	DT50_F t (días)	DT50_H d (días)	DT50_F l (días)
	Quizalofop-P-ethyl	372.81	1.10E-04	6.70E-05	0.61	1816.0	4.61	1.51	1.55	-	0.4	38.3	10.7	5.6
	Clethodim	359.92	2.08E+03	1,4 E-7	5450.00	22.7	4.14	11.1	7	-	0.55	5.45	estable	-
	Haloxypop-P-methyl	375.7	5.5 E-05	1.2 E-3	7.90	60.4	4	0.24	0.28	0.2	120	20	43	5
	Paraquat	186.25	1.00E+02	4 E-12	620000	1000000.0	-4.5	10	10	-	5000	estable	estable	-
	Oxyfluorfen	361.7	2.60E+01	0.02382	0.12	7565.8	4.86	29.2	-	-	138	5.6	estable	3.6
Insecticida	Thiamethoxam	291.71	6.60E-06	470 E-10	4100	56.2	-0.13	40	30.6	-	121	2.7	estable	9.1
	Methoxyfenozide	368.47	1.33E+01	1.64E-04	3.30	365.0	3.72	208.6	-	-	456	estable	estable	5.3
	Carbofuran	221.26	8.00E+02	5.00E-05	322.00	86.5	1.8	9.7	6.1	-	12.8	71	37	6.8
	Trichlorfon	257.4	5.01E-04	4.50E-07	120000.	10.0	0,43 (20C)	-	1.2	-	18	estable	1.6	3.9
	Imidacloprid	255.66	4.00E-04	1.70E-10	610	225.0	0.57	129	90	-	187	0.2	30	2.5
	Ethoprophos	242.3	1.23E-01	1.35E-02	1300	70.0	2.99	83	20	-	25	estable	estable	-
	Cadusafos	270.39	1.20E-01	0.132	245	227.0	3.85	215	37	-	56.7	174	estable	26,2
	Metam-sodium	129.19	5.75E-02	8.34E-06	578290	17.8	-2.91	0.07	-	-	10.8	0.05	2.2	-
Oxamyl	219.26	5.10E-05	4.89E-08	148100	16.6	-0.44	1.1	-	-	6.6	3.5	21.1	8.9	

<i>Clase</i>	<i>IA</i>	<i>MM</i> (g/mol)	<i>P_vapor</i> (Pa)	<i>C_Henry</i> (Pa*m3/mol)	<i>Sol_A</i> (mg/l)	<i>Koc/Kfoc</i> (ml/g)	<i>Co_C</i> <i>a</i> (log <i>Pow</i>)	<i>DT50_sis</i> <i>t</i> (días)	<i>DT50_A</i> <i>g</i> (días)	<i>DT50_se</i> <i>d</i> (días)	<i>DT50_S</i> <i>u</i> (días)	<i>DT50_F</i> <i>t</i> (días)	<i>DT50_H</i> <i>d</i> (días)	<i>DT50_F</i> <i>l</i> (días)
	Carbaryl	201.2 2	4.16E- 05	9.20E-05	9.10	300.0	2.36	5.8	3.1	-	16	10	12	6
	Chloropicrin	164.3 7	4.23E- 07	3.44E+02	2021	60.5	2.5	-	-	-	4.2	1.3	estable	-
	Diazinon	304.3 5	1.20E- 02	6.09E-02	60.00	609.0	3.69	10.4	4.3	-	9.1	50	138	3.4
	Acetamiprid	222.6 7	1.73E- 01	5.30E-08	2950	138.0	0.8	4,7*	-	-	1.6	34	estable	6.2
	Abamectin	873.1	3.70E- 06	< 2.7E-3	1.21	3997.0	4.4 ± 0.3	86.5	3	89.5	52.2	1.5	212.6	-
	Diflubenzuron	310.6 8	1.2E-04	4.70E-04	0.08	4620.0	3.89	4.5	3	-	3.2	80	96	11.7
	Novaluron	492.7	16	2	0.00	9598.0	4.3	17.5	0.95	-	9	139	estable	3.5
	Chlorpyrifos	350.5 8	1.43E- 03	4.78E-01	1.05	8151.3	4.7	36.5	5	-	386	29.6	53.5	7.2
	Naled	380.7 9	0.26	6.6	2000	180.0	2.18	-	-	-	4	4.4	4	-
	Benfuracarb	410.5 3	4.2E-03	2.10E-04	8.40	9100.0	4.22	0.4	-	-	39	4.3	20	4.3
	Endosulfan	406.9 3	8.3E-04	1.48	0.32	11500.0	4.75	-	-	-	39	-	20	4.3
	Pyriproxifen	321.3 7	13.3	1.16E-02	0.37	21175.0	5.37	6.5	1.6	-	6.7	11.5	estable	65.5
	Etofenprox	376.4 9	8.13E- 04	0.0136	0.02	17757.0	6.9	13.3	5.7	-	16	6.3	estable	2.1
	Spinetoram	754	0.06	3.50E-03	11.30	2544.0	4.2	243	5	166	16.1	0.4	estable	2.62

Clase	IA	MM (g/mol)	P_vapor (Pa)	C_Henry (Pa*m3/mol)	Sol_A (mg/l)	Koc/Kfoc (ml/g)	Co_Ca (log Pow)	DT50_sist t (días)	DT50_Ag g (días)	DT50_se d (días)	DT50_Su u (días)	DT50_Ft t (días)	DT50_H d (días)	DT50_Fl l (días)
	Spinosad	731.96	3.2E-08	-	290	34600	-	-	-	-	14	<1	259	-
	Hydramethylnon	494.48	2.70E-03	7.81E-01	0.01	730000	2.31	-	-	-	10	7	10	-
	Lambda-cyhalothrin	449.85	2.0E-04	2.00E-02	0.01	283707	5.5	15.1	0.24	-	175	40	estable	5.4

Datos: masa molar (MM), presión de vapor (P_vapor), constante de Henry (C_Henry), solubilidad en agua (Sol_A), coeficiente de partición del carbono orgánico (Koc/Kfoc), Coeficiente de carbono orgánico (Co_Ca), vida media en sistemas acuáticos (DT50_Sist), vida media por hidrólisis en agua (DT50_Ag), vida media por fotólisis en agua (DT50_Ft), vida media en sedimentos (DT50_Sed), vida media en suelo (DT50_Su), Fotólisis acuosa (DT50_Ft), Hidrolisis (DT50_H), vida media sobre el follaje (DT50_Fl)

Anexo 3. Script del análisis de sensibilidad de Morris en R

```
library(sensitivity)
library(rgl)

datos_DZ.morris <-
read.csv("C:/Users/jane/OneDrive/Documents/MORRIS/DIAZINON.csv")

morris.fun_matrix <- function(X){
  res_vector <- morris.fun(X)
  cbind(res_vector, 2 * res_vector)}

DZ <- morris(model = morris.fun, factors = datos_DZ.morris$variable_escenario, r =
12,
  design = list(type = "oat", levels = 3, grid.jump = 3))

plot(DZ, main = "Sensitivity Analysis with Morris Method_diazinon")
```

Anexo 4. Comparación de los 6 escenarios de papa que se incluyen en el programa PWC

Datos fenológicos de los diferentes escenarios para cultivo de papa					
Variables agronómicas	Florida	California	Washington	Indianápolis	Maryland
Fecha de siembra (día)	30	76	151	181	181
Fecha de maduración (días)	121	165	285	255	300
Fecha de cosecha (días)	150	195	301	285	305
Profundidad de raíces (cm)	30	91	30	60	60
Cobertura de dosel (%)	30%	100%	40%	40%	40%
Altura dosel (cm)	30	60	30	30	30
Retención de agua (cm)	0.1	0,15	0.1	0.1	0.1
Follaje posterior a la cosecha	Aplicación superficial	Aplicación superficial	Aplicación superficial	Aplicación superficial	Aplicación superficial
Ciclos por año	1	1	1	1	1
Duración del ciclo de cultivo (días)	150	195	301	285	305

Anexo 5. Transformación de los datos del clima para generar el archivo de clima con formato. wea para el modelo PWC.

1. Se deben acomodar los datos en una sola hoja de Excel, con el siguiente orden:

<i>Mes</i>	<i>Día</i>	<i>Año</i>	<i>Precipitación (mm/d)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Velocidad del viento (m/s)</i>	<i>Radiación solar (MJ/m²)</i>
01	01	97	7.6	24.6	2.2	8.6

2. Se debe convertir las unidades de precipitación, velocidad del viento y radiación solar:

- ✓ Precipitación (mm/d): se multiplica el valor por 0.1 para obtener la precipitación en cm/día.
- ✓ Velocidad del viento (m/s): se multiplica el valor por 100 para obtener la velocidad del viento en cm/s.
- ✓ Radiación solar (MJ/m²): se multiplica el valor por 11.574074 para obtener la radiación solar en w/m², el resultado se multiplica por 2.06364 para obtener la radiación solar en (La/d).

3. Se debe calcular la evapotranspiración (cm/d) a partir de la radiación solar:

- ✓ El valor de radiación solar (MJ/m²) se multiplica por 0.408 para obtener la radiación solar (mm/m²)
- ✓ Para calcular la evapotranspiración potencial diaria (ET₀) (mm/día) se aplica la formula:

$$(0.0135 * (t_{med} (°C) + 17.78)) * R_s \left(\frac{mm}{m^2} \right)$$

Donde:

ET₀ = evapotranspiración potencial diaria, mm/día

t_{med} = temperatura media, °C

R_s = radiación solar incidente, convertida en mm/día

- ✓ El resultado de la ecuación (ET₀ (mm/día), se multiplica por 0.1 para obtener la evapotranspiración (ET₀) en cm/día

4. De deben acomodar los datos con el siguiente orden específico:

<i>Mes</i>	<i>Día</i>	<i>Año</i>	<i>Precipitación (cm/d)</i>	<i>ET₀ (cm/d)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Velocidad del viento (cm/s)</i>	<i>Radiación solar (La/d).</i>
<i>01</i>	<i>01</i>	<i>1997</i>	<i>7.6</i>	<i>0.20</i>	<i>24.6</i>	<i>2.2</i>	<i>8.6</i>

5. **Archivo CSV:** Se debe transformar el archivo de excel en formato delimitado por comas (CSV): se deben eliminar los nombres de las columnas ya que el modelo PWC únicamente reconoce caracteres numéricos

6. **Archivo wea:** Se debe transformar el archivo CSV en formato “wea”

Anexo 6. Archivo digital con formato “wea” de la estación meteorológica de los Chiles, San Carlos, Costa Rica

https://drive.google.com/file/d/1CdYrkg8jrtBxagXgFv9A6LCA7QzRwC_N/view?usp=share_link

Anexo 7. Reporte de resultados del cálculo de la PEC con el modelo PWC, para el herbicida hexazinona, aplicando los datos de un cultivo de piña en la Zona Norte Norte de Costa Rica

Summary of Water Modeling of and the USEPA Standard Pond

Estimated Environmental Concentrations for are presented in Table 1 for the USEPA standard pond with the FLpotatoNMC field scenario. A graphical presentation of the year-to-year acute values is presented in Figure 1. These values were generated with the Pesticide Water Calculator (PWC), Version 2.001. Critical input values for the model are summarized in Tables 2 and 3.

This model estimates that about 2.5% of applied to the field eventually reaches the water body. The main mechanism of transport from the field to the water body is by runoff (59.5% of the total transport), followed by spray drift (39.4%) and erosion (1.1%).

In the water body, pesticide dissipates with an effective water column half-life of 17.6 days. (This value does not include dissipation by transport to the benthic region; it includes only processes that result in removal of pesticide from the complete system.) The main source of dissipation in the water column is hydrolysis (effective average half-life = 30 days) followed by metabolism (43.3 days), photolysis (4266.3 days), and volatilization (214290.3 days).

In the benthic region, pesticide dissipates (27.5 days). The main source of dissipation in the benthic region is metabolism (effective average half-life = 31.7 days) followed by hydrolysis (205 days). Most of the pesticide in the benthic region (85%) is sorbed to sediment rather than in the pore water.

Table 1. Estimated Environmental Concentrations (ppb) for hexazinona.

1-day Avg (1-in-10 yr)	7.097
4-day Avg (1-in-10 yr)	6.597
21-day Avg (1-in-10 yr)	5.764
60-day Avg (1-in-10 yr)	4.137
365-day Avg (1-in-10 yr)	1.394

Entire Simulation Mean	0.9704
------------------------	--------

Table 2. Summary of Model Inputs for hexazinona.

Scenario	FLpotatoNMC
Cropped Area Fraction	1
Koc (ml/g)	54
Water Half-Life (days) @ 20 °C	60
Benthic Half-Life (days) @ 30 °C	22
Photolysis Half-Life (days) @ 40 °Lat	56
Hydrolysis Half-Life (days)	30
Soil Half-Life (days) @ 20 °C	90
Foliar Half-Life (days)	11.3
Molecular Weight	252.31
Vapor Pressure (torr)	0.00000027
Solubility (mg/l)	29800
Henry's Constant	0.00000011

Table 3. Application Schedule for hexazinona.

Date (Days Since Emergence)	Type	Amount (kg/ha)	Eff.	Drift
15	Above Crop (Foliar)	1.125	0.99	0.1

Figure 1. Yearly Highest 1-day Average Concentrations

Anexo 8. Reporte de resultados del cálculo de la PEC con el modelo PWC, para el insecticida diazinon, aplicando los datos de un cultivo de piña en la Zona Norte Norte de Costa Rica

Summary of Water Modeling of diazinon and the USEPA Standard Pond

Estimated Environmental Concentrations for diazinon are presented in Table 1 for the USEPA standard pond with the FLpotatoNMC field scenario. A graphical presentation of the year-to-year acute values is presented in Figure 1. These values were generated with the Pesticide Water Calculator (PWC), Version 2.001. Critical input values for the model are summarized in Tables 2 and 3.

This model estimates that about 1.7% of diazinon applied to the field eventually reaches the water body. The main mechanism of transport from the field to the water body is by spray drift (59.4% of the total transport), followed by runoff (33.8%) and erosion (6.82%).

In the water body, pesticide dissipates with an effective water column half-life of 0.0 days. (This value does not include dissipation by transport to the benthic region; it includes only processes that result in removal of pesticide from the complete system.) The main source of dissipation in the water column is metabolism (effective average half-life = 3.1 days) followed by hydrolysis (9.1 days) and photolysis (3901.9 days).

In the benthic region, pesticide dissipates slowly (77.1 days). The main source of dissipation in the benthic region is metabolism (effective average half-life = 87.7 days) followed by hydrolysis (641.1 days). The vast majority of the pesticide in the benthic region (98.58%) is sorbed to sediment rather than in the pore water.

Table 1. Estimated Environmental Concentrations (ppb) for diazinon.

1-day Avg (1-in-10 yr)	40.89
4-day Avg (1-in-10 yr)	7.504
21-day Avg (1-in-10 yr)	1.437
60-day Avg (1-in-10 yr)	0.5123
365-day Avg (1-in-10 yr)	0.8952E-001

Entire Simulation Mean	0.4535E-001
------------------------	-------------

Table 2. Summary of Model Inputs for diazinon.

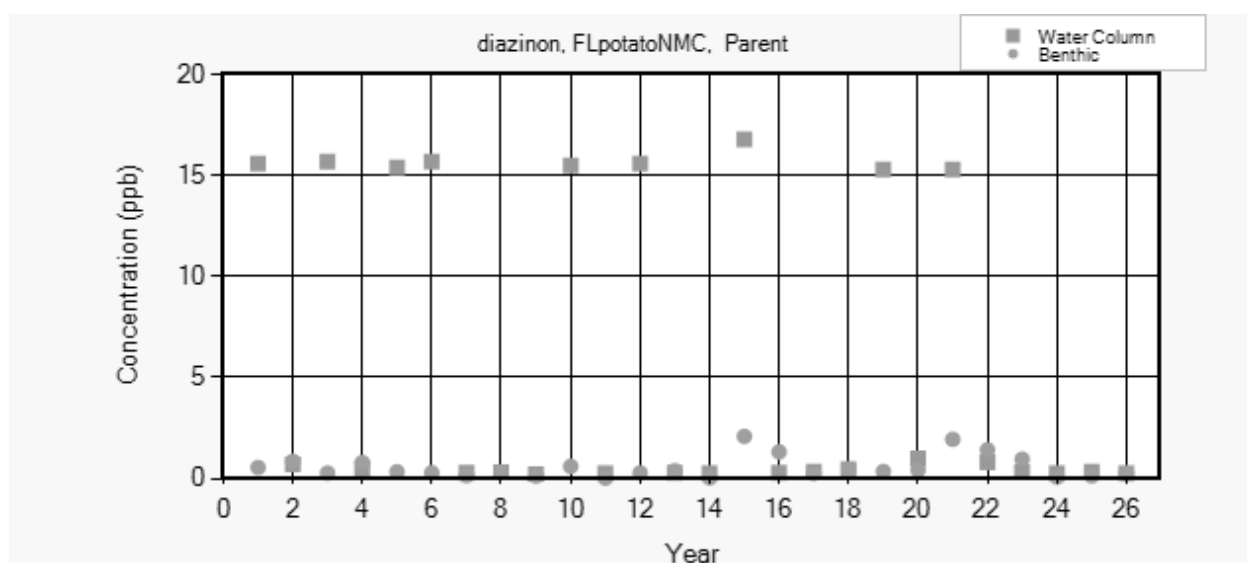
Scenario	FL_potato
Cropped Area Fraction	1
Koc (ml/g)	643
Water Half-Life (days) @ 20 °C	4.3
Benthic Half-Life (days) @ 50 °C	15.2
Photolysis Half-Life (days) @ 12 °Lat	39
Hydrolysis Half-Life (days)	9.1
Soil Half-Life (days) @ 3.4 °C	20
Foliar Half-Life (days)	304.35
Molecular Weight	0.0000898
Vapor Pressure (torr)	60
Solubility (mg/l)	0.0609
Henry's Constant	0.00476

Table 3. Application Schedule for diazinon.

Date (Days Since Emergence)	Type	Amount (kg/ha)	Eff.	Drift
60	Above Crop (Foliar)	3.6	0.99	0.1
75	Above Crop (Foliar)	3.6	0.99	0.1
90	Above Crop (Foliar)	3.6	0.99	0.1
105	Above Crop (Foliar)	3.6	0.99	0.1

120	Above (Foliar)	Crop	3.6	0.99	0.1
135	Above (Foliar)	Crop	3.6	0.99	0.1
150	Above (Foliar)	Crop	3.6	0.99	0.1
165	Above (Foliar)	Crop	3.6	0.99	0.1

Figure 1. Yearly Highest 1-day Average Concentrations



Anexo 9. Carpeta digital con los 426 reportes emitidos por el PWC, como resultado de todas las simulaciones con ambos plaguicidas y en la comparación de los tres escenarios.

https://drive.google.com/drive/folders/1mbQA-6mBOnNRW337ZGERuiN13LdiUnTM?usp=share_link

Anexo 10. Posibles valores de entrada propuestos para un modelaje de exposición en cultivo de piña, con condiciones similares a la región Huetar Norte, utilizando el programa PWC.

	Escenario	Cultivo de piña, Costa Rica
SUELO	Archivo meteorológico	Formato <i>.wea</i>
	Tipo de riego	Depende del patrón de uso
	Tasa Máxima de Suministro (cm/hr) *	Calculo en el anexo 12.
	Nivel de Agotamiento Permisible (NAP) *	0.5
	Fracción de agua adicional que se agrega al plaguicida	Calculo en el anexo 13.
	CULTIVO	Fecha de siembra (día/mes)
Días emergencia hasta madurez (día/mes)		12/8
Emergencia hasta cosecha (día/mes)		29/12
Profundidad de raíces		60 cm
%De cobertura		50%
Altura dosel		135 cm
Retención de agua (cm) ***		0.3
Follaje posterior a la cosecha		se remueve
Periodo de siembra		1 año
Duración del ciclo		365 días

*valor de NAP extraído de un estudio realizado por Abarca-Monge (2017).

Anexo 11. Archivo digital del posible escenario para Piña Costa Rica (CR_piña)

[https://drive.google.com/drive/folders/19MZ6BbocCa7hax-1IkTvG68gVZUbnWk-
?usp=share_link](https://drive.google.com/drive/folders/19MZ6BbocCa7hax-1IkTvG68gVZUbnWk-?usp=share_link)

Anexo 12. Cálculo de la tasa máxima de aplicación TMA

Densidad de la piñera: 60,000 plantas/ha/ 10 000 m²= **6 plantas/m²**

Requerimiento de agua por plata: 75mm/mes/planta (Vásquez et al., 2022)

Requerimiento de agua por día: 2.5 mm/día/planta

Requerimiento de agua por hora: **0.104 mm/hora/planta**

Cantidad de agua requerida por m²: (0.104 mm/hora/planta * 6 plantas/m²) = 0.625 mm/hora/m², sabiendo que 1mm =1L/m² = 0.625 L/hora/m²

Para calcular la tasa de suministro de agua (TMA) en centímetros por hora, sabiendo que 1 L/m²/h equivale a 0.1 cm/h.

$$\text{TMA} = 0.625 \text{ litro/m}^2 \text{ por hora} \times 0.1 \text{ cm/h} = 0.0625 \text{ cm/h}$$

Anexo 13. Cálculo de la fracción de agua para diazinon.

Para calcular la fracción de agua adicional se utiliza la siguiente ecuación:

Fracción de agua adicional = (Volumen de agua necesario para la aplicación - Volumen de agua utilizado para mezclar el plaguicida) / Volumen de agua necesario para la aplicación

1. Primero, debemos calcular la cantidad total de plaguicida requerida para las 8 aplicaciones en 1 hectárea (cantidad total de plaguicida = dosis recomendada x número de aplicaciones)

Cantidad total de plaguicida = 3.6 L/ha x 8 aplicaciones Cantidad total de plaguicida = 28.8 L/ha

2. Luego, calculamos la cantidad de plaguicida que necesitamos para la aplicación (cantidad de plaguicida para la aplicación = cantidad total de plaguicida / volumen de aplicación)

Cantidad de plaguicida para la aplicación = 28.8 L/ha / 3000 L/ha Cantidad de plaguicida para la aplicación = 0.0096 L

3. La concentración del plaguicida es del 60%, es decir 0.6 L de ingrediente activo por litro de producto comercial

Cantidad de IA = 0.0096 L x 0.6 = 0.00576 L

Cantidad de agua necesaria para mezclar con la cantidad de plaguicida = 0.0096 L x 0.4 = 0.00384 L

4. Por lo tanto, la fracción de agua adicional para esta aplicación es:

Fracción de agua adicional = (3000 L/ha - 0.00384 L) / 3000 L/ha Fracción de agua adicional = **0.99999**