

UNIVERSIDAD NACIONAL  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN ECOTOXICOLOGÍA TROPICAL

RETOS Y OPORTUNIDADES EN EL USO DE MODELOS DE EXPOSICIÓN  
ACUÁTICA PARA EL REGISTRO DE PLAGUICIDAS DE USO AGRÍCOLA EN  
COSTA RICA.

INTI ACEDO VÁSQUEZ

HEREDIA, COSTA RICA

FEBRERO 2020

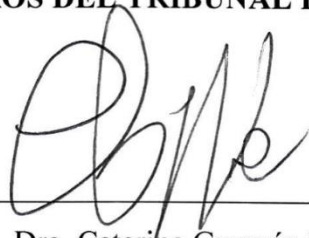
TESIS SOMETIDA A CONSIDERACIÓN DEL TRIBUNAL EXAMINADOR DEL  
POSGRADO ECOTOXICOLOGÍA TROPICAL CON ÉNFASIS ACUÁTICO PARA  
OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER SCIENTIAE

“Retos y oportunidades en el uso de modelos de exposición acuática para el registro de plaguicidas de uso agrícola en Costa Rica”

Inti Acedo Vásquez

Tesis presentada para optar al grado de Magíster Scientiae en Ecotoxicología Tropical con énfasis acuático cumple con los requisitos establecidos por el Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.

**MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR**



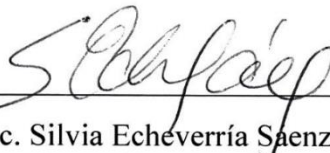
Dra. Caterina Guzmán Verri  
Representante del Consejo Central de Posgrado



Dra. Kinndle Blanco Peña  
Coordinadora del posgrado



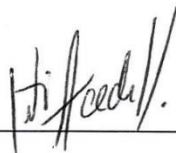
MSc. Clemens Ruedert  
Tutor de tesis



MSc. Silvia Echeverría Saenz  
Miembro del Comité Asesor



Dr. Elidier Vargas Castro  
Miembro del Comité Asesor



Inti Acedo Vásquez  
Sustentante

## **Resumen**

Los plaguicidas utilizados en la agricultura pueden entrar en los cuerpos de agua y tener efectos sobre otros organismos en el ambiente. Para evitar efectos negativos sobre los ecosistemas se recomienda que los países realicen un proceso de registro en el cual se requiere una evaluación del riesgo ambiental (ERA) de cada ingrediente activo y de sus productos formulados.

Un componente de la ERA es la caracterización de la exposición que se realiza con modelos de cálculo. En nuestro país como en el resto de América Latina, se vienen utilizando modelos de exposición desarrollados considerando las características de las regiones templadas, como Estados Unidos de América (EUA) y Europa, los cuales tienen limitaciones para su uso y no contemplan las condiciones ambientales tropicales. Sin embargo, el desarrollo de un modelo que incorpore las condiciones agroambientales propias del país es costoso y la opción de adoptar alguno de los modelos disponibles de otras latitudes resulta más factible. Por esto, el objetivo general de este proyecto es analizar la aplicabilidad de dos modelos de cálculo de exposición a plaguicidas para cuerpos de agua, en el proceso de registro de plaguicidas en Costa Rica.

En primer lugar, se buscó conocer las características generales de los modelos FOCUS y PWC. Además, con ambos modelos se calculó las concentraciones ambientales estimadas de cuatro plaguicidas (clorpirifos, diuron, etoprofos y metalaxil) con base en el uso agronómico autorizado en el país. Estas concentraciones fueron comparadas con las concentraciones ambientales medidas en diferentes regiones de Costa Rica. Esta información permitió determinar los retos y oportunidades que representan los modelos FOCUS y PWC para el uso en el proceso de registro de plaguicidas en Costa Rica.

Las características de los modelos cumplen con el 46, 38 y 65% para FOCUS 1-2, FOCUS 3 y PWC de las condiciones para la aplicación en Costa Rica. Con respecto a su aplicabilidad en el sistema de registro de Costa Rica se encontró que: 1) la principal limitante es que los escenarios incluidos corresponden a regiones templadas con condiciones muy distintas a las del trópico; 2) FOCUS 1-2 es aplicable en los primeros niveles de la evaluación de riesgo acuático en el sistema de registro de Costa Rica; 3) FOCUS 3 tiene diez escenarios

específicos para las regiones de la UE pero que se pueden hacer modificaciones para adaptarlos a las condiciones de Costa Rica; 4) PWC tiene escenarios estándar para distintas regiones de los EUA y la interfaz permite que realizar ajustes a los datos, así como crear y manipular nuevos escenarios, por lo que el modelo que presenta más oportunidades para desarrollar escenarios propios de Costa Rica.

Los cálculos realizados con los modelos muestran que FOCUS 1-2 dieron resultados de concentraciones más altas que las concentraciones ambientales en todos los casos, mientras que FOCUS 3 tuvo un 25% de subestimaciones. Por su parte, PWC estimó el 17% por debajo de las concentraciones ambientales. Con ambos modelos, para todos los cultivos excepto caña de azúcar (con PWC), hubo escenarios en los que las estimaciones fueron muy cercanas a la concentración máxima medida (concentración estimada/concentración medida < 10). Estos resultados sugieren que: 1) los escenarios utilizados no son apropiados y es necesario desarrollar escenarios que representen las condiciones de Costa Rica y; 2) los datos de las concentraciones ambientales medidas son insuficientes para este tipo de comparación y no están directamente relacionados con las condiciones de uso de plaguicidas que se están estimando con los modelos.

## Índice

Resumen .....	5
Lista de abreviaturas .....	11
Descriptores .....	13
Introducción.....	14
Objetivos.....	17
Objetivo general.....	17
Objetivos específicos .....	17
Estado actual del conocimiento .....	18
Los plaguicidas agrícolas y su dispersión ambiental en el agua superficial .....	18
Evaluación del riesgo ambiental de plaguicidas .....	20
Proceso de ERA para el registro de plaguicidas en la Unión Europea .....	22
Proceso de ERA para el registro de plaguicidas en los Estados Unidos de América .....	28
El proceso de registro de plaguicidas en Costa Rica .....	30
Metodología.....	31
Descripción de los modelos FOCUS y PWC.....	31
Generación de base datos de plaguicidas medidos en aguas superficiales .....	33
Selección de los plaguicidas y cálculo de las concentraciones ambientales estimadas ....	34
Aplicación del modelo FOCUS .....	37
Aplicación del modelo PWC .....	39
Comparación de las concentraciones estimadas y las concentraciones medidas.....	39
Resultados.....	40
Descripción de los modelos FOCUS y PWC.....	40
Base de datos de concentraciones ambientales de plaguicidas medidos en cuerpos de agua .....	41
Concentraciones ambientales estimadas con FOCUS .....	48
Concentraciones ambientales estimadas con PWC.....	48
Discusión .....	51
Conclusiones.....	59
Recomendaciones .....	60
Bibliografía.....	62
Anexos .....	68

## Lista de cuadros

Cuadro 1. Factores que influyen en el destino ambiental de los plaguicidas aplicados en campos agrícolas (Traducido de Leonard, 1990). _____	19
Cuadro 2. Propiedades más importantes de los diez escenarios definidos por FOCUS para el nivel 3 de exposición (FOCUS, 2015). _____	24
Cuadro 3. Preguntas para la identificación de retos y oportunidades del uso de los modelos FOCUS y PWC en el proceso de registro de plaguicidas agrícolas de Costa Rica. _____	32
Cuadro 4. Uso agronómico seleccionado para los cuatro plaguicidas según las regiones donde fueron medidos. _____	36



## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Procesos de destino del plaguicida en el ambiente acuático (Traducido de Xie, 2016).	20
<b>Figura 2.</b> Enfoque general de la evaluación de riesgo ambiental (Adaptado de Teklu et al, 2015).	21
<b>Figura 3.</b> Enfoque de cuatro niveles para el análisis de la exposición de aguas superficiales a plaguicidas en Europa (FOCUS, 2015).	23
<b>Figura 4.</b> Representación esquemática de los escenarios de cuerpos de agua utilizados por FOCUS en los niveles 1, 2 y 3 de los modelos de exposición (adaptado de Xie, 2016).	26
<b>Figura 5.</b> Secuencia de herramientas y modelos utilizados para calcular la exposición a plaguicidas para cuerpos de agua en los escenarios propuestos para el nivel 3 de FOCUS. Basado y traducido de (van den Berg et al, 2015).	27
<b>Figura 6.</b> Secuencia de herramientas y modelos utilizados para calcular la exposición a plaguicidas para cuerpos de agua en PWC. Basado y traducido de Huff Hartz, Edwards, & Lydy, 2017.	28
<b>Figura 7.</b> Representación esquemática del escenario de cuerpo de agua utilizado por el modelo PWC (adaptado de Xie, 2016).	29
<b>Figura 8.</b> Precipitación y temperatura promedio en las regiones de Costa Rica y los escenarios de EUA y UE utilizados para el cálculo de las concentraciones.	41
<b>Figura 9.</b> Puntaje de cumplimiento de las características de los escenarios, datos de entrada y resultados de los modelos FOCUS y PWC.	43
<b>Figura 10.</b> Concentraciones medidas de fungicidas en cuerpos de agua de cuatro regiones de Costa Rica.	44
<b>Figura 11.</b> Concentraciones medidas de herbicidas en cuerpos de agua de cuatro regiones de Costa Rica.	45
<b>Figura 12.</b> Concentraciones medidas de insecticidas en cuerpos de agua de cuatro regiones de Costa Rica.	46
<b>Figura 13.</b> Concentraciones medidas de nematicidas en cuerpos de agua de cuatro regiones de Costa Rica.	47
<b>Figura 14.</b> Concentraciones de cuatro plaguicidas ( $\mu\text{g/L}$ ) estimadas con los modelos FOCUS en los tres niveles, en comparación con las concentraciones medidas ( $\mu\text{g/L}$ ).	49
<b>Figura 15.</b> Concentraciones de cuatro plaguicidas ( $\mu\text{g/L}$ ) estimadas con el modelo PWC, en comparación con las concentraciones medidas ( $\mu\text{g/L}$ ).	50

## Lista de anexos

<b>Anexo 1.</b> Base de datos de concentraciones ambientales de plaguicidas detectados en cuerpos de agua de Costa Rica en el periodo entre 2006 y 2017.....	68
<b>Anexo 2.</b> Valores de entrada que requieren los modelos FOCUS y PWC.....	69
<b>Anexo 3.</b> Propiedades físicas y químicas de los 53 plaguicidas medidos en cuerpos de agua de Costa Rica (estudios del IRET 2006-2017) y en el Plan Nacional de Monitoreo de los cuerpos de agua superficiales. ....	71
<b>Anexo 4.</b> Escenarios, cultivos y condiciones agronómicas seleccionadas en los modelos FOCUS y PWC. ....	75
<b>Anexo 5.</b> Ejemplo de los reportes generados por los modelos FOCUS para clorpirifos .....	78
<b>Anexo 6.</b> Ejemplo del reporte generado por PWC para clorpirifos .....	83
<b>Anexo 7.</b> Reportes generados por los modelos FOCUS y PWC.....	85
<b>Anexo 8.</b> Toma de decisiones con base en la ERA utilizando modelos de cálculo de la exposición. ....	86

## **Lista de abreviaturas.**

AEC: aplicación por encima del cultivo

ADC: aplicación por debajo del cultivo

AS: aspersión al suelo

C\_Henry: constante de Henry

CGR: Contraloría General de la República

CE<sub>50</sub>: concentración de efecto media

CL<sub>50</sub>: concentración letal media

DA: Dirección de Agua, MINAE

DAM: dosis de aplicación máxima de producto formulado

DIGECA: Dirección de Gestión de Calidad Ambiental

DT<sub>50\_A</sub>: vida media en agua

DT<sub>50\_Ase</sub>: vida media en sistemas de agua y sedimentos

DT<sub>50\_F</sub>: vida media por fotólisis

DT<sub>50\_</sub>: Foliar: vida media en el follaje

DT<sub>50\_H</sub>: vida media por hidrólisis

DT<sub>50\_Su</sub>: vida media en suelo

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

ERA: Evaluación de riesgo ambiental

EUA: Estados Unidos de América

FAP: forma de aplicación

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

FIFRA: Ley Federal de Insecticidas, Fungicidas y Rodenticidas

FOCUS: Foro para la coordinación de modelos de destino de plaguicidas y su uso

GR: granulado

Geneec: GENeric Estimated Exposure Concentration

IA: ingrediente activo

IntApl: intervalo entre aplicaciones

IRET: Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas

Koc/Kfoc: Coeficiente de partición materia orgánica y agua

L: aplicación líquida

LOC: niveles de preocupación (“Levels of Concern”)

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía

MAp: Momento y forma de aplicación

MM: masa molar

Nmax: número máximo de aplicaciones

NOEC: concentración sin efecto observado

OMS: Organización Mundial de la Salud

P\_vapor: presión de vapor

PEC: concentración ambiental estimada

PECsw: concentración ambiental predicha en agua superficial

PNEC: concentración estimada de no efecto

PRZM: Pesticide Root Zone Model

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

S: aplicación sólida

Sol\_A: solubilidad en agua

STEPS 1-2: Herramienta para predicciones de exposición para agua superficial, pasos 1 y 2

SWASH: Surface Water Scenarios Help

TA: tasa de aplicación del ingrediente activo

TOXSWA: TOXic substances in Surface Waters

UE: Unión Europea

UEAA: Unidad de Evaluación Ambiental de Agroinsumos

VVWM: Variable Volume Water Model

<50cm: aplicación manual por debajo de 50 cm

## **Descriptores**

concentraciones ambientales estimadas, cuerpos de agua, modelos de exposición, registro de plaguicidas, evaluación de riesgo ambiental, FOCUS, PWC.

## **Introducción**

Los plaguicidas son ampliamente utilizados en la agricultura para proteger a los cultivos de diversas plagas, pero estos también pueden entrar en los cuerpos de agua y tener efectos sobre otros organismos en el ambiente (Knauer, 2016). Para evitar efectos negativos sobre los ecosistemas y la salud humana, así como otros aspectos de calidad, de seguridad y de eficacia, la FAO recomienda que los países cuenten con un “proceso de autorización de uso” o un “registro”. En este proceso se debe determinar qué ingredientes activos con sus respectivos productos formulados estarán permitidos para ser utilizados y para qué propósitos, y de esta manera, garantizar un uso eficaz de los productos para que los intereses de los usuarios finales y el ambiente estén bien protegidos (FAO/OMS, 2010).

En dicho proceso de autorización de uso o registro, previo a la comercialización y al uso de plaguicidas agrícolas se requiere, entre otros, una evaluación del riesgo ambiental de cada ingrediente activo y de sus productos formulados (Boivin & Poulsen, 2017). La evaluación de riesgo ambiental contempla en general dos insumos principales: por un lado, se realiza la evaluación de la exposición, que se basa en el uso de modelos que permiten estimar o predecir cuáles serán las concentraciones ambientales luego de la aplicación del plaguicida y, por otro lado, se debe conocer cuáles son los efectos potenciales del plaguicida sobre los organismos (Knäbel *et al*, 2014).

Específicamente en Costa Rica, el uso de metodologías de evaluación de riesgo ambiental a plaguicidas es reciente y surgió a raíz de la intervención de la Contraloría General de la República (CGR) (CGR, 2004). La CGR señaló que el país no contaba con un sistema de registro que integrara la evaluación de riesgos al ambiente, la salud y la agricultura, por lo que, dentro de sus disposiciones indicó que se debía incluir al Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y la evaluación de riesgo ambiental, en el proceso de registro de plaguicidas. Es a partir del año 2007 que se cuenta con un reglamento que exige a los registrantes de plaguicidas la información necesaria para dicha evaluación (Decreto Ejecutivo N° 33495-MAG-S-MINAE-MEIC, 2007), la cual queda a cargo de la Dirección de

Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA) del MINAE y en el año 2011 publica el primer procedimiento (DIGECA, 2011), el cual fue recientemente actualizado (UEAA, 2017).

Para conocer la exposición real, es decir, las concentraciones ambientales que existen en las aguas superficiales, se utilizan los datos de monitoreo de los plaguicidas ya utilizados en el país (con autorización y registro vigente). Estos datos de monitoreo son muy útiles para valorar la exposición en los casos en los que se solicite la revisión de las autorizaciones de uso de plaguicidas, para aumentar la vigencia del registro de determinado producto (Knauer, 2016). En Costa Rica, Castillo, De la Cruz, & Ruepert (1997) identificaron ocho estudios de residuos de plaguicidas entre 1987 y 1995. Datos más recientes señalan que los insecticidas y los nematocidas son los grupos más relacionados con problemas ambientales y han sido reportados en el Pacífico Norte y Sur, Caribe Norte y Sur y en el Valle Central (de la Cruz *et al*, 2014). Si bien se han desarrollado estudios en distintas zonas del país, en la Vertiente del Caribe hay estudios importantes que revelan los efectos de los plaguicidas usados en los monocultivos de banano y piña, ya que se han evidenciado eventos de mortalidad masiva de peces que podrían estar asociados a la presencia de plaguicidas (Polidoro & Morra, 2016), así como efectos en macroinvertebrados (Castillo *et al*, 2006; Echeverría-Sáenz *et al*, 2012, 2016), plantas (Echeverría-Sáenz *et al*, 2012) y caimanes (Grant, Woudneh, & Ross, 2013).

Existen datos más recientes de presencia de plaguicidas en cuerpos de agua a lo largo de los años en varios proyectos de investigación de las universidades estatales. Estos estudios, en general, han sido vinculados con zonas específicas: como en el Caribe por la presencia de la actividad bananera y piñera (Arias-Andrés *et al*, 2018; Castillo *et al*, 2006; Diepens *et al*, 2014; Echeverría-Sáenz *et al*, 2012; Echeverría-Sáenz *et al*, 2018; Rämö *et al*, 2018), en la zona hortícola de Pacayas (Fournier *et al*, 2010), la zona norte donde predomina la actividad piñera (Fournier *et al*, 2018). Además, se empezó a implementar en el año 2013 el Plan Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos de Agua Superficiales coordinado por el MINAE, con el cual se está generando datos de presencia de plaguicidas organoclorados y organofosforados en varios ríos del país (Dirección de Agua, 2013). Sin embargo, la información generada por los diferentes entes involucrados se encuentra dispersa y, hasta la fecha no se ha utilizado en la revisión de los plaguicidas registrados.

Por otro lado, para predecir las concentraciones ambientales de plaguicidas que se espera encontrar en un cuerpo de agua superficial cercano a un área de cultivo agrícola, en Costa Rica como en el resto de América Latina, se vienen utilizando modelos de exposición para evaluar el riesgo ambiental de las sustancias que solicitan un registro en el país. Los modelos de exposición son un importante componente de la evaluación de riesgo ambiental de los plaguicidas, que integra datos de su comportamiento de partición (hidrofobicidad) y degradación, el escenario ambiental y las emisiones, a fin de compilar una imagen de la distribución y los flujos químicos en el entorno multimedia (Di Guardo *et al*, 2017). Para modelar el destino de los plaguicidas en los cuerpos de agua, deben tenerse en cuenta las características espaciales de gestión de la tierra y del paisaje, la meteorología e hidrología temporalmente variables, así como los procesos de disipación en el río (Holvoet *et al*, 2007). Sin embargo, los principales modelos de exposición disponibles han sido desarrollados considerando las características presentes en las regiones templadas, como Estados Unidos de América (EUA) y Europa, los cuales tienen limitaciones para su uso y no contemplan las condiciones ambientales tropicales (Carriquiriborde *et al*, 2014; Bach & Hollis, 2012). Según Carriquiriborde *et al* (2014) en América Latina se necesita un modelo simple, conservador y fiable para implementar la caracterización de exposiciones acuáticas y que los modelos para estimar las exposiciones utilizados en otros procesos de registro de plaguicidas en otras partes del mundo deberían revisarse para establecer cuáles son adecuados y aplicables para su uso en América Latina.

A nivel de la normativa costarricense, esta revisión no ha sido realizada y existe la necesidad de contar con un modelo que permita estimar las concentraciones de plaguicidas para los usos agronómicos propuestos para Costa Rica. Este análisis es fundamental por cuanto el resultado de los modelos debe integrarse con la evaluación de los efectos sobre los organismos (obtenida de los expedientes presentados por las empresas que solicitan el registro de un plaguicida), para finalmente llevar a cabo la evaluación de riesgo ambiental. El resultado de este trabajo por parte de las autoridades estatales vela por que los plaguicidas que se registran sean seguros para el ambiente y da a los agricultores las indicaciones de uso agronómico que garantizan esa seguridad.



Sin embargo, el desarrollo de un modelo que incorpore las condiciones agroambientales propias del país para cada región agrícola es costoso y la opción de adoptar alguno de los modelos disponibles de otras latitudes resulta más factible. Para esto, se hace necesario un proceso de análisis de las características de los modelos más comúnmente utilizados y que se realice una evaluación técnica de su aplicabilidad en la predicción de las concentraciones ambientales para Costa Rica. Estos avances en la revisión y aplicación de metodologías de evaluación de riesgo ambiental pueden ser aprovechados por otros países de la región y de esta forma ampliar la protección ambiental desde los sistemas de registro de plaguicidas.

## **Objetivos**

### *Objetivo general*

Analizar la aplicabilidad de dos modelos de cálculo de exposición a plaguicidas para cuerpos de agua, en el proceso de registro de plaguicidas en Costa Rica.

### *Objetivos específicos*

1. Determinar los retos y oportunidades que representa el uso de los modelos de exposición FOCUS y PWC con base en la descripción de sus características y los resultados que se obtiene de éstos.
2. Comparar los datos de concentraciones de plaguicidas medidas en cuerpos de agua a partir de los proyectos de investigación del IRET y del Plan Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos de Agua Superficiales con los resultados de los modelos de exposición FOCUS y PWC.
3. Valorar la aplicabilidad de los modelos FOCUS y PWC en la estimación de la exposición ambiental a plaguicidas en cuerpos de agua dentro del proceso de registro en Costa Rica.

## **Estado actual del conocimiento**

### *Los plaguicidas agrícolas y su dispersión ambiental en el agua superficial*

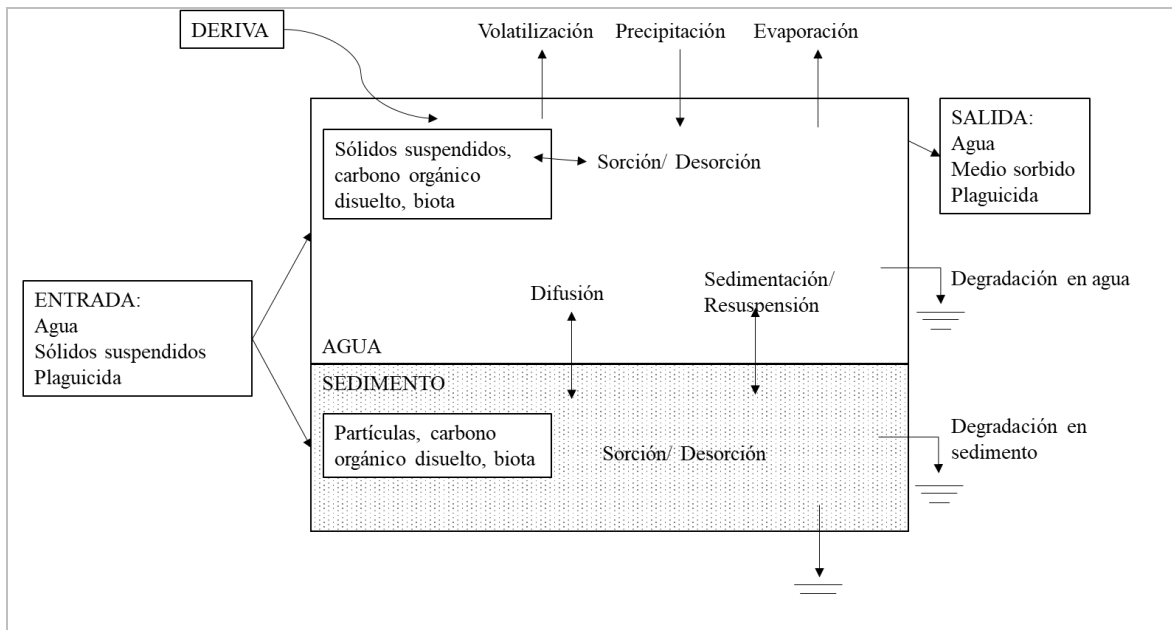
Un plaguicida es definido como cualquier sustancia o mezcla de sustancias con ingredientes químicos o biológicos destinados a repeler, destruir o controlar cualquier plaga, o a regular el crecimiento de las plantas (FAO/OMS, 2017). Estos son comercializados como plaguicidas o productos formulados, los cuales contienen al ingrediente activo (IA), que se refiere a la parte del producto que proporciona la acción biocida del plaguicida (Decreto Ejecutivo N° 40059-MAG-MINAE-S, 2017).

Su uso se da en diferentes ámbitos, principalmente en la producción agrícola. Los sistemas de producción agrícola en los países situados en los trópicos generalmente están bajo una mayor presión de plagas debido a las condiciones ambientales favorables para que proliferen los insectos y las malezas. Esto, junto con el cambio de las prácticas productivas, la expansión agrícola y el cambio climático está llevando a una mayor dependencia de los plaguicidas (Lewis, 2016). Por ejemplo, Costa Rica cuenta, desde hace varios años, con una agricultura intensiva de exportación que ha generado un aumento de las importaciones de sustancias químicas utilizadas en las labores agrícolas, alcanzando más de 10.600 toneladas de IA por año desde el 2011 (FAO, 2019).

Los plaguicidas pueden dispersarse fuera de su área de aplicación por la combinación de factores climáticos, del suelo, químicos y de manejo que caracterizan a cada campo, cultivo y estación del año (Capel, Larson, & Winterstein, 2001). Algunos de estos factores se describen en el cuadro 1. Los plaguicidas pueden ingresar a los sistemas fluviales por medio de fuentes puntuales, como drenajes directos de plantas empacadoras en puntos específicos del río, o como fuentes difusas que son entradas a lo largo de todo el curso de agua, por ejemplo, mediante los procesos de escorrentía (Holvoet, Seuntjens, & Vanrolleghem, 2007). La figura 1 muestra los procesos que pueden dirigir el destino ambiental de los plaguicidas una vez que han entrado al ecosistema acuático.

Cuadro 1. Factores que influyen en el destino ambiental de los plaguicidas aplicados en campos agrícolas (Traducido de Leonard, 1990).

<b>Factores</b>	<b>Descripción</b>
<b>Climáticos</b>	
Lluvia	El tiempo transcurrido entre la aplicación de plaguicidas y la lluvia, así como la intensidad, cantidad y duración de la lluvia influyen en la concentración de plaguicidas en el agua de escorrentía.
Temperatura	El aumento de la temperatura normalmente aumenta la solubilidad de los plaguicidas y disminuye la adsorción física.
<b>Suelo</b>	
Textura y contenido de materia orgánica	Afecta las tasas de infiltración y escorrentía, la adsorción y movilidad de los plaguicidas, la erosión del suelo, el potencial de transporte de partículas y los factores de enriquecimiento químico.
Compactación de la superficie	Disminuye las tasas de infiltración, reducen el tiempo de escorrentía y aumentan las concentraciones iniciales de plaguicidas solubles.
Contenido de agua	Puede aumentar el potencial de escorrentía, reducir el tiempo de escorrentía y reducir la lixiviación de sustancias químicas solubles debajo de la superficie del suelo antes del inicio de la escorrentía.
Pendiente	Puede aumentar la tasa de escorrentía, el desprendimiento y el transporte del suelo, y aumentar la profundidad de la superficie efectiva para la extracción química.
Grado de agregación y estabilidad de las partículas del suelo	Afectan las tasas de infiltración, el potencial de formación de costras, la profundidad efectiva del arrastre químico, el potencial de transporte de sedimentos y el enriquecimiento químico adsorbido en los sedimentos.
<b>Plaguicida</b>	
Solubilidad en agua	Los plaguicidas solubles pueden eliminarse más fácilmente de los residuos del cultivo y el follaje durante la lluvia inicial o ser lixiviados en el suelo.
Propiedades de adsorción	Los plaguicidas fuertemente adsorbidos en el suelo se retendrán cerca del sitio de aplicación, es decir, posiblemente en la superficie del suelo y serán más susceptibles a la escorrentía.
Polaridad/naturaleza iónica	La adsorción de compuestos no polares está determinada por la materia orgánica del suelo; mientras que los compuestos ionizados y ácidos / bases débiles están más afectados por la superficie mineral y el pH del suelo. Los compuestos liófilos son retenidos en el follaje por la superficie de la hoja y ceras, mientras que los compuestos polares se eliminan más fácilmente del follaje por la lluvia.
Persistencia	Los plaguicidas que permanecen en la superficie del suelo durante períodos de tiempo más largos debido a su resistencia a la volatilización, la degradación química, fotoquímica y biológica tienen una mayor probabilidad de escurrimiento.



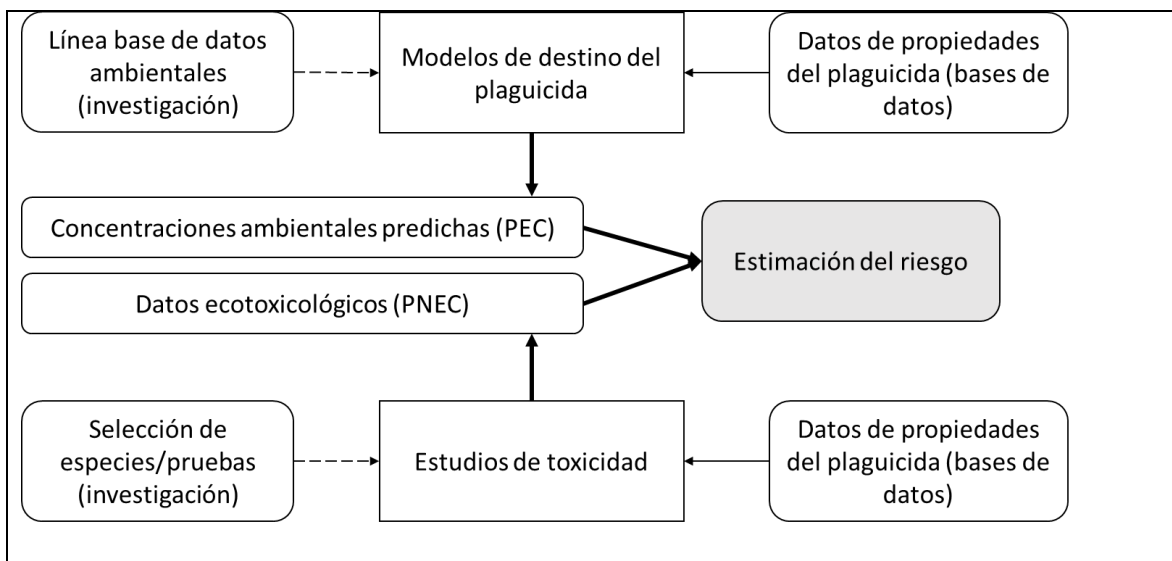
**Figura 1.** Procesos de destino del plaguicida en el ambiente acuático (Traducido de Xie, 2016).

Dentro del ambiente acuático, los plaguicidas pueden generar efectos sobre los organismos. Los efectos directos son aquellos que son causados por una acción fisiológica del plaguicida sobre un organismo, mientras que los efectos indirectos son mediados por las interacciones ecológicas de las diferentes especies que componen la comunidad (Schäfer, Van den Brink, & Liess, 2011). Los efectos tóxicos de los plaguicidas sobre los organismos no objetivo, es decir aquellos que no son la plaga a combatir, van a depender de la concentración del plaguicida y de la sensibilidad de las especies expuestas, en los organismos acuáticos la exposición es continua y hay una adsorción directa del agua (Walker, Hopkin, & Sibly, 2001).

### *Evaluación del riesgo ambiental de plaguicidas*

La evaluación del riesgo ambiental (ERA) se define como un proceso que evalúa la probabilidad de que se produzcan efectos ecológicos adversos como resultado de la exposición a uno o más factores estresantes (EPA, 1992). La evaluación del riesgo de plaguicidas es un proceso científico que puede describirse mediante tres pasos principales. Primero, se debe definir la evaluación del peligro del compuesto como su ecotoxicidad y efectos sobre los organismos. En segundo lugar, debe determinarse la evaluación de la

exposición para predecir cuál será la ocurrencia (concentración) del compuesto en el ambiente, después de haberse utilizado según ciertos lineamientos. Por último, la evaluación del riesgo se realiza con la combinación tanto de ecotoxicidad, como de exposición al compuesto, derivando una relación de caracterización y estimación del riesgo que es la razón de la exposición entre el efecto, tal como se observa en la figura 2 (Boivin & Poulsen, 2017).



**Figura 2.** Enfoque general de la evaluación de riesgo ambiental (Adaptado de Teklu *et al.*, 2015).

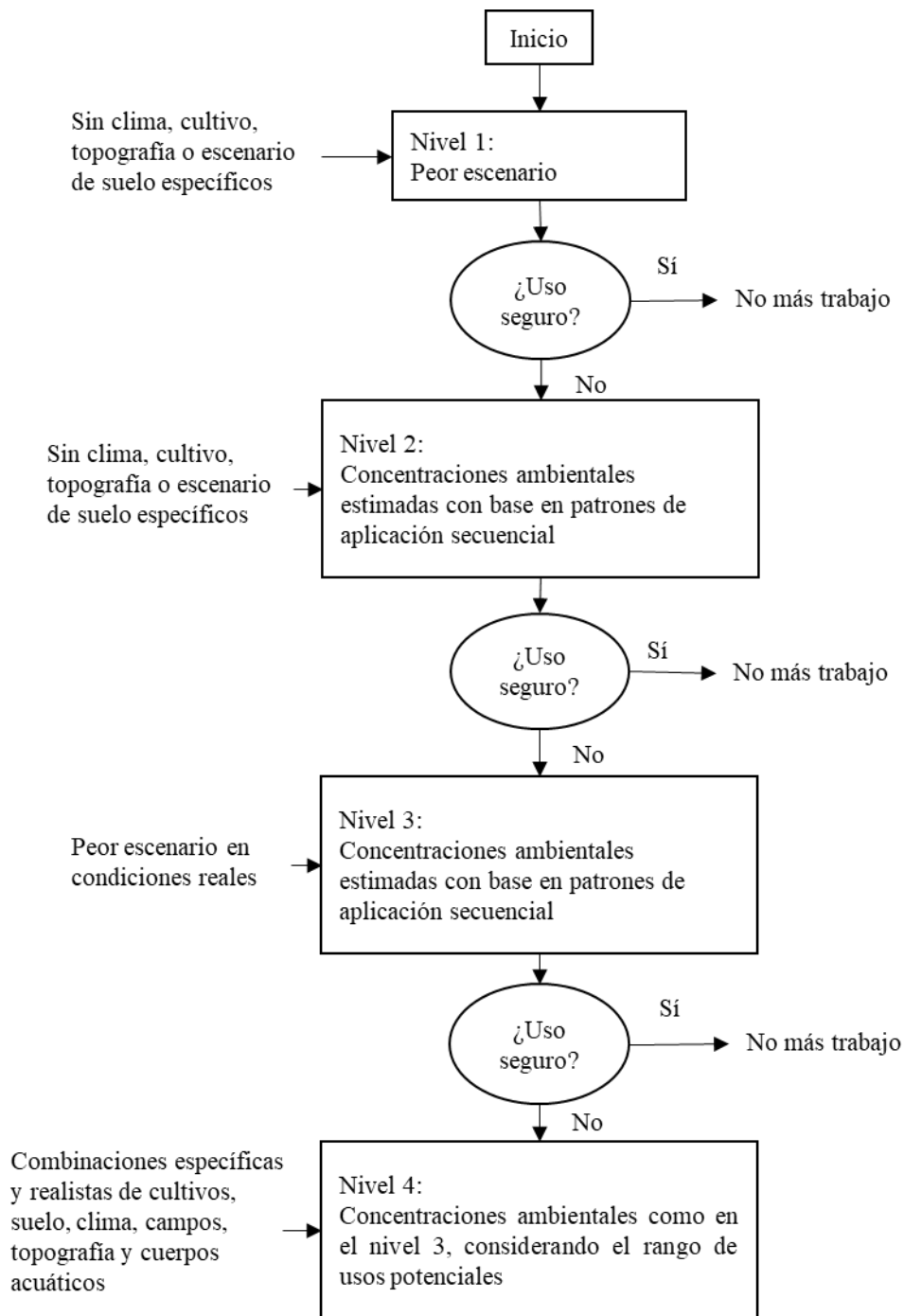
La información sobre los efectos (PNEC; Predicted No Effect Concentration) se obtiene de los resultados de estudios ecotoxicológicos de los organismos (peces, invertebrados acuáticos y algas). Una vez realizados los estudios en todos los diferentes organismos, se utiliza el dato de la especie más sensible, el cual puede ser la concentración letal media (CL<sub>50</sub>), concentración de efecto media (CE<sub>50</sub>) o concentración sin efecto observado (NOEC). La información sobre la exposición (PEC; Predicted Environmental Concentration) se obtiene de los modelos que la calculan con base en una representación del peor escenario de exposición y las intenciones de uso del plaguicida (Boivin & Poulsen, 2017); estos modelos regulatorios son simples, conservadores y permiten seleccionar productos químicos en una amplia gama de sitios de uso (Young, 2019). A partir de esta información y del análisis científico, en los procesos regulatorios, se toma una decisión sobre la autorización de uso de los productos formulados con el ingrediente activo.

## *Proceso de ERA para el registro de plaguicidas en la Unión Europea*

Para minimizar el riesgo para los organismos no objetivo, la Unión Europea (UE) prescribe una evaluación del riesgo ecotoxicológico dentro del procedimiento de registro de los plaguicidas, que consiste en una evaluación de la exposición y del efecto (Comisión Europea, 2009). Como parte de este procedimiento, se estableció en 1991 el “Foro para la coordinación de modelos de destino de plaguicidas y su uso” (FOCUS) para establecer la forma de llevar a cabo la evaluación de la exposición (FOCUS, 2015).

FOCUS plantea el uso de modelos para determinar la concentración ambiental prevista (PEC) en aguas superficiales y sedimentos con un enfoque por cuatro niveles, de manera que se empieza con cálculos simples y conservadores y conforme se va avanzando, se van introduciendo más variables en el análisis (ver figura 3). El primer paso representa un enfoque simple que asume un “peor escenario extremo” donde la carga química que llega al cuerpo de agua es equivalente a la máxima aplicación anual del plaguicida. El segundo paso es la estimación de las concentraciones ponderadas en el tiempo, tomando en cuenta la degradación del plaguicida que se da entre las aplicaciones sucesivas. El tercer paso se centra en un modelado más detallado, tomando en cuenta cantidades realistas de residuos de plaguicida como “peor escenario realista” que entran al agua a través de rutas de acceso relevantes (deriva, escorrentía, drenaje, deposición atmosférica). El último paso considera las cargas de la sustancia del paso 3, pero también toma en cuenta una variedad de opciones de refinamiento de diferentes grados de complejidad que cubren las medidas de mitigación de riesgo, refinamiento de los parámetros de entrada, o enfoques regionales y de paisaje (FOCUS, 2015).

Para los niveles 1 y 2, se ha desarrollado el programa “Surface water Tool for Exposure Predictions – Steps 1 & 2” (STEPS 1-2). Este programa cuenta con suposiciones comunes para los pasos 1 y 2, como son las dimensiones del cuerpo de agua de 30 cm de profundidad y una capa de sedimentos de 5 cm, bajo contenido de carbono orgánico en los sedimentos y una proporción entre el campo agrícola y el cuerpo de agua de 10:1. Estos niveles representan el peor escenario ya que no son específicos para ningún clima, cultivo, topografía o suelo tipo (FOCUS, 2015) y se combina la escorrentía y el drenaje (SETAC, 2010).



**Figura 3.** Enfoque de cuatro niveles para el análisis de la exposición de aguas superficiales a plaguicidas en Europa (FOCUS, 2015).

Cuadro 2. Propiedades más importantes de los diez escenarios definidos por FOCUS para el nivel 3 de exposición (FOCUS, 2015).

Escenario	Temperatura promedio anual (°C)	Precipitación anual (mm)	Suelo	Carbono orgánico (%)	Pendiente (%)	Cuerpos de agua
D1 (Lanna, Suecia)	6,1	556	Arcilla limosa	2,0	0-0,5	Canal, río
D2 (Brimstone, UK)	9,7	642	Arcilla	3,3	0,5-2	Canal, río
D3 (Vredepeel, Países Bajos)	9,9	747	Arena	2,3	0-0,5	Canal
D4 (Skousbo, Dinamarca)	8,2	659	Franco	1,4	0,5-2	Estanque, río
D5 (La Jaillièrre, Francia)	11,8	651	Franco	2,1	2-4	Estanque, río
D6 (Thiva, Grecia)	16,7	683	Franco arcilloso	1,2	0-0,5	Canal
R1 (Weiherbach, Alemania)	10,0	744	Franco limoso	1,2	3	Estanque, río
R2 (Porto, Portugal)	14,8	1402	Franco arenoso	4	20	Río
R3 (Bologna, Italia)	13,6	682	Franco arcilloso	1	10	Río
R4 (Roujan, Francia)	14,0	756	Franco arcillo limoso	0,6	5	Río

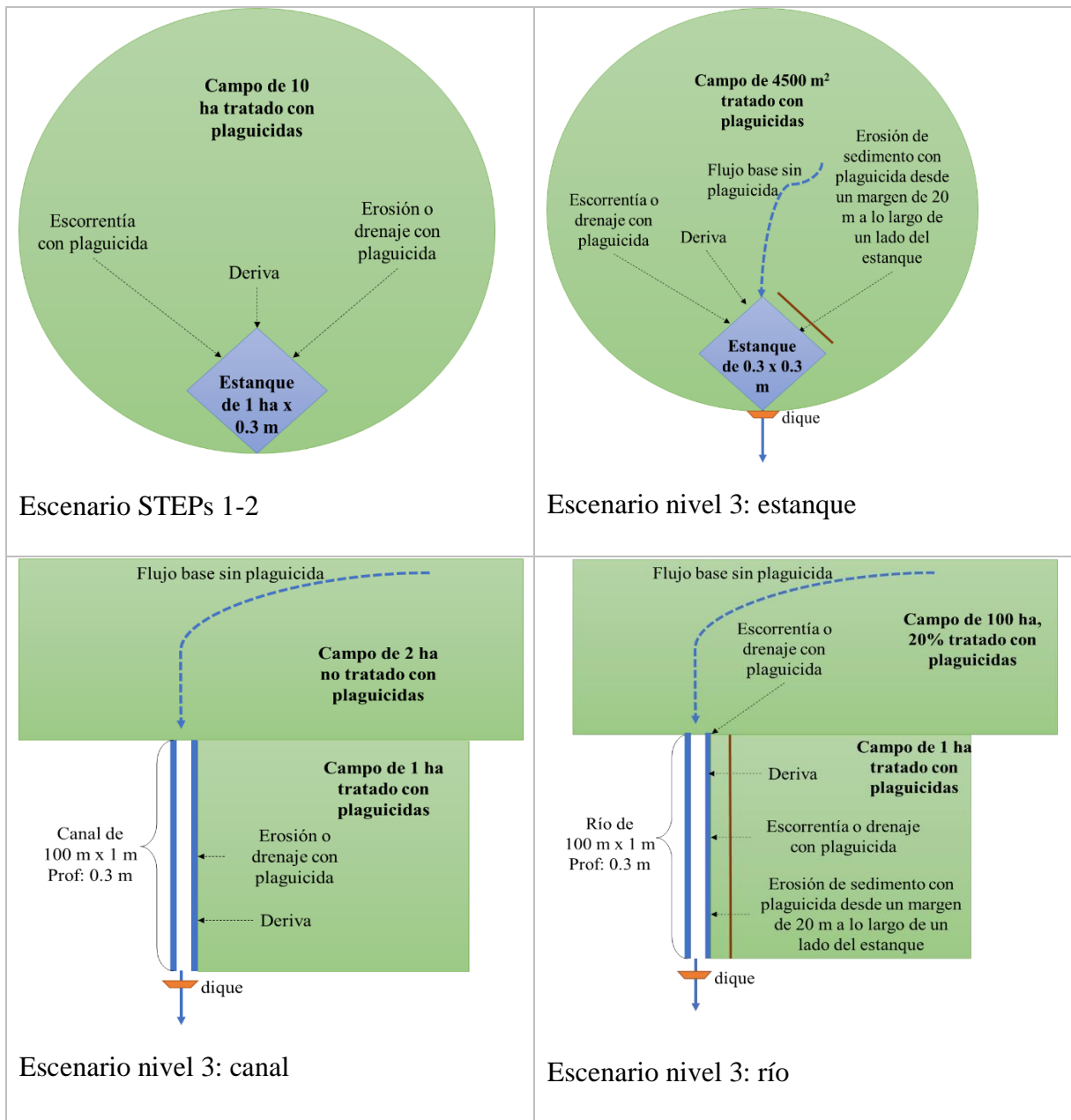
Para el nivel 3, se han definido diez escenarios realistas del peor caso para el compartimento de agua superficial, que representan colectivamente la agricultura en la UE (aproximadamente el 33% del área está cubierta por los escenarios). Estos escenarios fueron definidos a partir de las características del clima (precipitación promedio anual, lluvia diaria máxima en primavera, temperaturas promedio de primavera y otoño, recarga promedio anual), del paisaje (pendiente, textura del suelo, estado de drenaje, material de origen), del uso de tierra y cultivos (cobertura de la tierra, cultivos), cuerpos de agua (estanques estáticos o de poco movimiento, canales de relativamente poco movimiento, ríos de primer orden) con



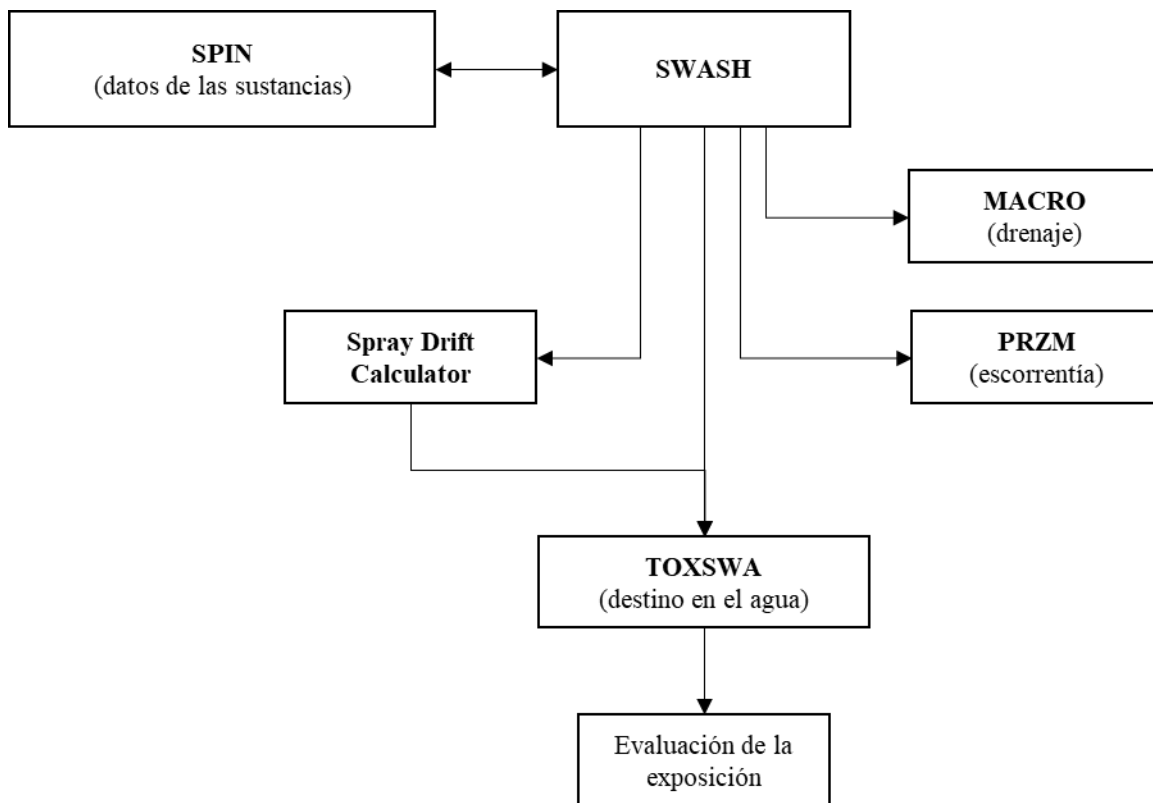
lo cual se obtuvo los siguientes diez escenarios de exposición, en los cuales la escorrentía y el drenaje se consideran por separado y nunca se supone que ocurren en paralelo en la misma ubicación (SETAC, 2010). Se indica con “D” los escenarios que corresponden a drenaje mientras que los escenarios “R” corresponden a escorrentía. Los datos específicos de las principales propiedades que definen cada uno de los diez escenarios se muestra en el cuadro 2. Una de estas propiedades es el tipo de cuerpo de agua asociado a cada escenario, en la figura 4 se muestran los escenarios con las tres categorías de cuerpos de agua para el nivel 3.

Para garantizar una selección adecuada de los escenarios FOCUS y sus respectivos cálculos, se integró una serie de modelos en la herramienta “Surface Water Scenarios Help” (SWASH) (figura 5). SWASH es una interfaz que incorpora una calculadora de deriva, los modelos PRZM (Pesticide Root Zone Model) y MACRO que calculan los flujos de agua y sustancia que ingresan al cuerpo de agua por escorrentía/erosión y drenaje y el modelo TOXSWA (Toxic Substances in Surface Waters) que simula el destino ambiental del plaguicida en el cuerpo de agua. En el modelo TOXSWA se integra la carga resultante de la deposición de la deriva por aspersión y la escorrentía/erosión o el drenaje calculados por los modelos antes mencionados (FOCUS, 2015).

En el nivel 4 se utilizan las mismas herramientas que en el nivel 3, realizando cambios que aumenten el realismo y disminuyan el conservadurismo y la incertidumbre. De esta manera, se pueden generar escenarios específicos dependiendo de los usos propuestos y las áreas de preocupación desencadenadas por la evaluación de nivel 3.



**Figura 4.** Representación esquemática de los escenarios de cuerpos de agua utilizados por FOCUS en los niveles 1, 2 y 3 de los modelos de exposición (adaptado de Xie, 2016). Las flechas azules punteadas representan en cuerpo de agua antes de entrar al campo tratado con plaguicidas; las flechas azules completas representan la salida del agua al pasar el dique; las flechas negras representan diferentes rutas de entrada del plaguicida al cuerpo de agua.



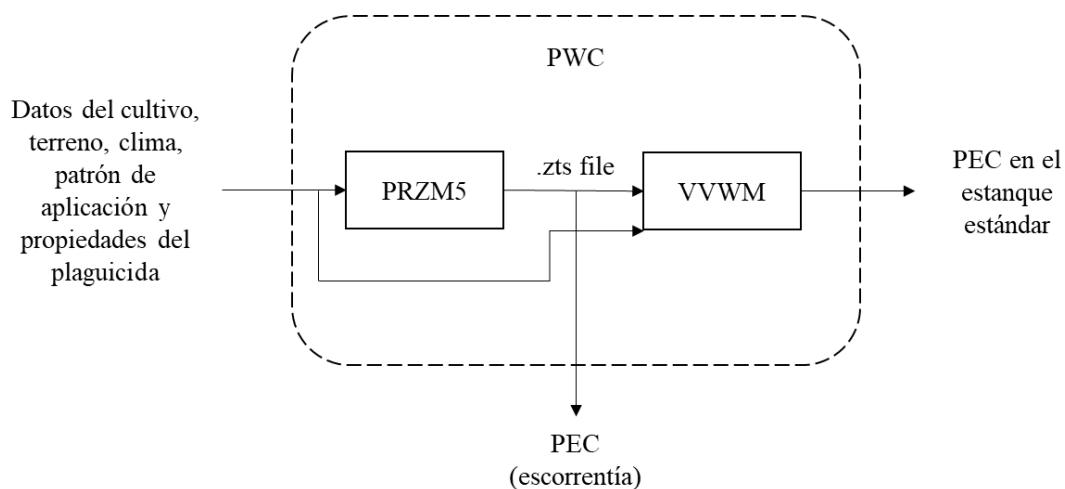
**Figura 5.** Secuencia de herramientas y modelos utilizados para calcular la exposición a plaguicidas para cuerpos de agua en los escenarios propuestos para el nivel 3 de FOCUS. Basado y traducido de (van den Berg *et al*, 2015).

Siguiendo los pasos anteriores, los Estados Miembros de la UE evalúan la posibilidad de exposición de los organismos acuáticos a los productos formulados en las condiciones de uso propuestas en una solicitud de registro. Cuando exista la posibilidad de que resulten expuestos organismos acuáticos, se considera el cociente PNEC/PEC para los peces, dafnias y algas y se aplica un factor de seguridad de 100 para exposición aguda y de 10 para exposición crónica. En los casos en que PNEC/PEC es inferior al factor de seguridad, el riesgo se considera inaceptable (Comisión Europea, 2011). Si el riesgo es inaceptable existe la posibilidad de hacer estudios adicionales tanto de los efectos en los organismos como de las propiedades del plaguicida y del ambiente, en busca de un escenario más realista para determinar si es posible autorizar su uso (EFSA, 2013).

## *Proceso de ERA para el registro de plaguicidas en los Estados Unidos de América*

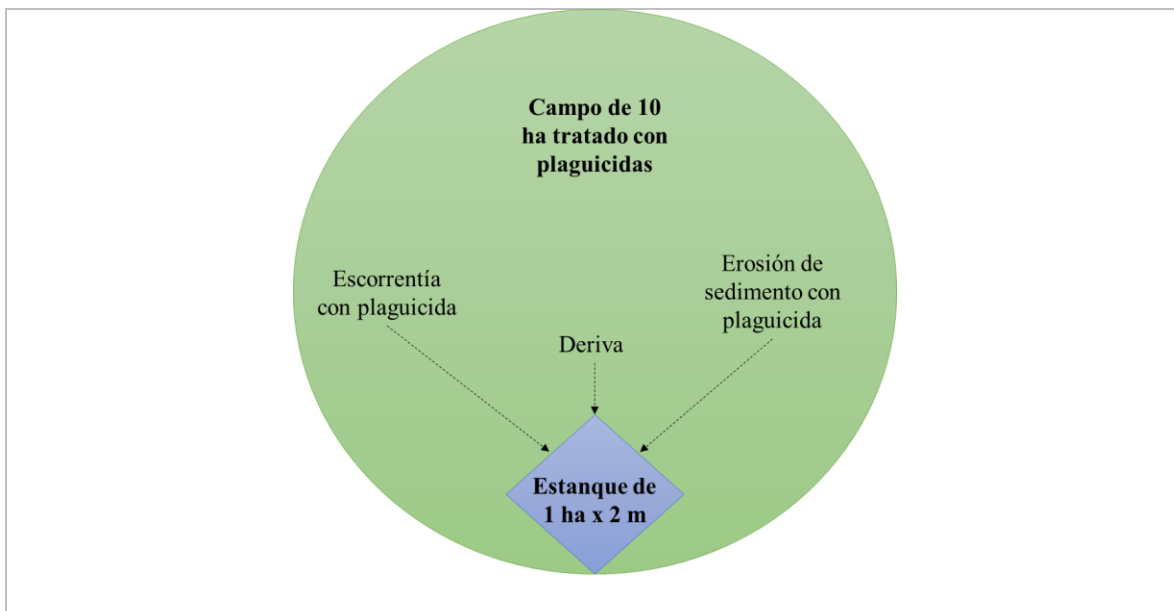
En EUA se regula la venta, distribución y uso (que puede incluir la eliminación) de plaguicidas con base en la Ley Federal de Insecticidas, Fungicidas y Rodenticidas (FIFRA) (EPA, 2017). Generalmente, antes de que un plaguicida se pueda vender o distribuir, debe estar registrado en la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Para otorgar el registro, el solicitante debe demostrar, entre otras, que el uso del plaguicida de acuerdo con las especificaciones "generalmente no causará efectos adversos irrazonables sobre el medio ambiente" (EPA, 2017).

Para la caracterización de la exposición a los cuerpos de agua, la Oficina del Programa de Plaguicidas (OPP) desarrolló el modelo "Pesticide in Water Calculator" (PWC). Este modelo calcula las concentraciones estimadas de plaguicidas (PEC) en aguas superficiales con las características del plaguicida, la forma de uso y datos de clima combinados con un escenario estándar que corresponde a un estanque ubicado en el borde de un campo agrícola. El PWC integra los modelos "Pesticide Root Zone Model" (PRZM) y "Variable Volume Water Model" (VWWM), como se muestra en la figura 6 (Young, 2016a).



**Figura 6.** Secuencia de herramientas y modelos utilizados para calcular la exposición a plaguicidas para cuerpos de agua en PWC. Basado y traducido de Huff Hartz, Edwards, & Lydy, 2017.

PRZM utiliza datos meteorológicos históricos que incluyen la información sobre la precipitación diaria, la evaporación, la temperatura, la velocidad del viento y la radiación solar para calcular los flujos diarios de escorrentía y dispersión de los campos agrícolas "estándar" durante un período de simulación (típicamente 30 años). Estos campos estándar están parametrizados para representar cultivos y regiones particulares de los EUA, por ejemplo, maíz cultivado en el estado de Ohio. 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, 2016). El cuerpo de agua es un estanque de granja que representa un escenario de exposición altamente vulnerable al estar ubicado en el borde de un campo tratado con plaguicidas. El estanque es de 1 ha con una profundidad de 2 m y es alimentado por una cuenca hidrográfica de 10 ha (ver la figura 7). Se usó para el modelo un estanque agrícola típico del Estado de Georgia (USDA, 1982 citado por Young, 2016).



**Figura 7.** Representación esquemática del escenario de cuerpo de agua utilizado por el modelo PWC (adaptado de Xie, 2016).

El modelo permite introducir nuevos escenarios. También, se puede definir cuerpos de agua personalizados con dimensiones específicas del área de campo, área del cuerpo de agua con profundidades distintas y con una longitud hidráulica. El cuerpo de agua personalizado puede

tener un volumen variable, o un volumen constante sin o con un flujo a través. Esta opción permite una mayor flexibilidad para evaluar el transporte y el destino del plaguicida en un cuerpo de agua receptor no estándar (USDA, 1982 citado por Young, 2016). De esta forma, el refinamiento del cálculo de la exposición se puede llevar a cabo modificando los valores de entrada de manera que se establezcan escenarios más realistas.

Esta caracterización de la exposición se relaciona con la caracterización de los efectos que se basa en estudios ecotoxicológicos. El cálculo del riesgo (RQ) está basado en esa relación PEC/PNEC que se compara con niveles de preocupación (“Levels of Concern” o LOC) que tiene definidos la EPA y se determina la necesidad de considerar medidas regulatorias (EPA, s.f.).

#### *El proceso de registro de plaguicidas en Costa Rica*

El registro de plaguicidas en Costa Rica es una responsabilidad del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), por medio del Servicio Fitosanitario del Estado (SFE). Para la evaluación de los impactos sobre la salud y el ambiente se cuenta con participación del Ministerio de Salud (MS) y del MINAE.

La DIGECA del MINAE se basa para la evaluación ambiental en el documento “Procedimiento general y lineamientos a seguir por parte del MINAET para la Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA) para el Registro de Plaguicidas Sintéticos Formulados” (MINAET, 2011). En este procedimiento, se incluyó una estimación de la concentración de los plaguicidas en cuerpos de agua para un primer nivel de evaluación, basado en un procedimiento del Manual Técnico Andino para el Registro y Control de Plaguicidas Químicos de Uso Agrícola (Secretaría General de la Comunidad Andina, 2002) y para el refinamiento, se utilizaba un programa de la EPA, el Geneec (GENeric Estimated Exposure Concentration) (Tsuzuki *et al*, 2003).

En noviembre del 2017, DIGECA publicó una actualización de esta herramienta en su página web (<http://www.digeca.go.cr/areas/plaguicidas>). En esta última versión, para el cálculo de la exposición a cuerpos de agua, se recomienda los modelos de FOCUS con una serie de

ajustes para incluir los cultivos de Costa Rica que no están contemplados en el FOCUS, así como sugerencias para la selección de la región y época de aplicación más representativa.

Con base en esta metodología, el MINAE realiza el cálculo de la exposición acuática a determinado plaguicida y el resultado de este, se combina con los datos ecotoxicológicos presentados en la solicitud de registro y se realiza la evaluación de riesgo ambiental. Para determinar si el riesgo es aceptable para organismos acuáticos, se utilizan los valores críticos de 100 para exposición aguda y de 10 para exposición crónica. El criterio emitido por el MINAE es utilizado por el SFE en la decisión de otorgar un nuevo registro.

## **Metodología**

Con este proyecto se buscó, en primer lugar, conocer las características generales de los modelos FOCUS y PWC. Además, con ambos modelos se calculó las concentraciones ambientales estimadas de cuatro plaguicidas, siguiendo las instrucciones de los manuales de cada modelo, así como la aplicación de los enfoques de evaluación de la exposición de cada uno. Estas concentraciones fueron comparadas con las concentraciones ambientales medidas en diferentes regiones de Costa Rica. Esta información permitió determinar los retos y oportunidades que representan los modelos FOCUS y PWC para el uso en el proceso de registro de plaguicidas en Costa Rica.

### *Descripción de los modelos FOCUS y PWC*

Antes de utilizar los modelos FOCUS y PWC se analizó más de fondo las características de cada uno: el tipo de datos de entrada que requiere cada modelo y la forma de introducirlos, los escenarios y tipos de cuerpos de agua incluidos, los cultivos representados y el tipo de resultado generado.

Para esto se plantearon trece preguntas (ver cuadro 3) sobre las condiciones para que los modelos puedan ser adoptados y adaptados para la aplicación en el proceso de registro a nivel

nacional. Se aplicó para evaluar el cumplimiento de la condición un puntaje de no cumplimiento (0), parcialmente (1) y completamente (2).

Estas condiciones permitieron identificar los retos y oportunidades que supone su uso en el proceso de registro de plaguicidas agrícolas, considerando como oportunidades aquellas características que cumplen con la condición y como retos la falta de cumplimiento. Se sumó los valores de esta clasificación para cada modelo para obtener una calificación de la aplicabilidad.

Cuadro 3. Preguntas para la identificación de retos y oportunidades del uso de los modelos FOCUS y PWC en el proceso de registro de plaguicidas agrícolas de Costa Rica.

Tema	Pregunta
Escenarios	¿El modelo basa sus estimaciones en escenarios genéricos para cualquier condición de clima, región y práctica agronómica?
	¿El modelo cuenta con escenarios con clima similar al de Costa Rica?
	¿La interfaz del modelo permite hacer modificaciones de variables propias de los escenarios?
	¿El modelo cuenta con escenarios con cuerpos de agua similares a los de Costa Rica?
	¿Se pueden crear nuevos escenarios representativos de las condiciones de Costa Rica para incorporarlos en el modelo?
Datos de entrada	¿El modelo requiere datos de propiedades físico-químicas disponibles en las solicitudes de registro?
	¿El modelo cuenta con opciones de métodos de aplicación de plaguicidas acordes con las prácticas agronómicas de Costa Rica?
	¿El modelo permite indicar aplicaciones de plaguicidas a lo largo de todo el año?
	¿El modelo incluye los cultivos que se desarrollan en Costa Rica?
Resultados	¿El modelo da resultados de la concentración de plaguicida en el agua en distintos momentos después de la aplicación?
	¿El modelo genera un reporte que resuma los resultados obtenidos?
	¿El usuario tiene acceso a los resultados "en bruto" de todas las estimaciones realizadas por el modelo?
	¿El modelo hace una interpretación de los procesos de destino y comportamiento ambiental del plaguicida analizado?



## *Generación de base datos de plaguicidas medidos en aguas superficiales*

Se recopiló los estudios a nivel nacional de los últimos 10 años con resultados de plaguicidas medidos en aguas superficiales presentes en zonas de producción agrícola, los cuales no estaban asociados a eventos puntuales de contaminación. Se utilizó los datos disponibles del Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas de la Universidad Nacional (IRET) reportados en nueve estudios publicados y desarrollados en las regiones Central Oriental “CO” (Fournier et al, 2010), Chorotega “C” (Mena et al, 2014), Huetar Caribe “HC” (Echeverría-Sáenz et al, 2012; Diepens et al, 2014; Arias-Andrés et al, 2018; Echeverría-Sáenz et al, 2018; Polidoro & Morra, 2016; Rämö et al, 2018) y Huetar Norte “HN” (Fournier et al, 2018) y los resultados de la fase 2 del Plan Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos de Agua Superficiales de la Dirección de Aguas del MINAE en los ríos de la región Huetar Caribe disponibles hasta octubre del 2018 (Dirección de Agua, 2018).

Con la información de estos estudios se creó una base de datos con la información de los plaguicidas detectados, sus concentraciones reportadas, su acción biocida, el sitio de muestreo y el tipo de cuerpo de agua (es decir si es un río, quebrada, canal o laguna) y la fecha del muestreo. A cada plaguicida se le asignó un código de identificación conformado por la letra “P” y la numeración desde 01 hasta 53 con el fin de simplificar los nombres de los archivos de entrada y salida de los modelos.

En los estudios del IRET los resultados se encuentran reportados como valores máximos y promedios de las concentraciones ambientales medidas para cada plaguicida en cada punto muestreado. Para obtener todos los datos utilizados en los estudios, se obtuvo las bases de datos de cada estudio con el detalle de todas las mediciones consideradas.

En la base de datos se incorporó las características químicas ambientales relevantes de cada plaguicida para su uso dentro los dos modelos, obtenidas de la base de datos de propiedades de plaguicidas PPDB (PPDB, 2018). Se refiere a los siguientes datos: masa molar (MM), solubilidad en agua (Sol\_A), vida media por hidrólisis en agua (DT50\_H), vida media por fotólisis en agua (DT50\_F), vida media en sistemas acuáticos (DT50\_Ase), vida media en agua (DT50\_A), vida media en suelo (DT50\_Su), coeficiente de partición del carbono orgánico (Koc/Kfoc), presión de vapor (P\_vapor), constante de Henry (C\_Henry) y vida

media foliar (DT50\_Foliar). La vida media en sedimentos (DT50\_Se) no estaba disponible en la base de datos PPDB, por lo que se utilizó el mismo que la vida media en el sistema acuático (agua-sedimento). La base de datos que se generó está disponible en forma digital en un CD adjunto (anexo 1) mientras que las propiedades físico-químicas de los plaguicidas se muestran en el anexo 3.

### *Selección de los plaguicidas y cálculo de las concentraciones ambientales estimadas*

Cuatro plaguicidas fueron seleccionados para ser utilizados en los modelos para estimar sus concentraciones ambientales bajo diferentes escenarios de cultivo y de aplicación. Para la selección se utilizó los siguientes criterios:

1. Solo se consideró los plaguicidas que tenían todos los datos de propiedades físico-químicas disponibles, de manera que se pudiera introducir toda la información necesaria para el funcionamiento de los modelos.
2. Solo se consideró los plaguicidas para los cuales se cuenta con más de 20 datos de concentraciones ambientales medidas en la base de datos.
3. Se seleccionó un plaguicida para cada acción biocida: insecticida, herbicida nematocida y fungicida.

Los cuatro plaguicidas seleccionados fueron clorpirifos (insecticida), diuron (herbicida), etoprofos (nematocida) y metalaxil (fungicida).

Para cada plaguicida seleccionado se identificó su uso agronómico que representa el peor escenario de aplicación: la dosis más alta recomendada y el mayor número de aplicaciones autorizado en cada cultivo en la región correspondiente (cuadro 4). Este uso agronómico fue el que se utilizó para desarrollar los cálculos con los modelos y se estableció con base en los siguientes supuestos:

1. Se identificó 126 productos formulados con uso agronómico autorizado en el país y que contienen alguno de los cuatro plaguicidas seleccionados. Para esto se consultó

el sistema en línea INSUMOSYS, del Servicio Fitosanitario del Estado (SFE, 2018).

2. A partir de los datos de uso agronómico reportados en este sistema, para cada producto formulado identificado se indicó la concentración del ingrediente activo y el tipo de formulación<sup>1</sup>, así como todos los cultivos, dosis, número de aplicaciones e intervalo entre aplicaciones en los que está autorizado su uso. Se incluyó la forma de aplicación líquida para las formulaciones EC, SC y WP y aplicación sólida para los plaguicidas granulados. Se obtuvo un total de 695 datos de usos agronómicos entre los cuatro plaguicidas. Sin embargo, no en todos los casos se indicaba la información completa, por lo que solo se utilizó aquellos usos agronómicos en los que la información de dosis, número de aplicaciones e intervalo entre aplicaciones está completa.
3. Se consultó los Planes Regionales de Desarrollo Agropecuario y Rural de las regiones Central Oriental, Huetar Caribe y Huetar Norte (CSRA Central Oriental, 2015; COSAR Huetar Caribe, 2015; CSRA Huetar Norte, 2015) y se identificó los cultivos que se siembran en cada una. Las regiones corresponden a las áreas donde alguno de los cuatro plaguicidas fue detectado.
4. De todos los usos agronómicos autorizados para cada plaguicida, se escogió sólo los usos en cultivos que se siembran en las regiones donde fue detectado.
5. Para cada plaguicida y cada cultivo asociado, se seleccionó el uso de mayor carga química: el que indica la dosis más alta y el mayor número de aplicaciones.
6. Finalmente, con la información de INSUMOSYS y la consulta a expertos en agronomía (F. Ramírez, comunicación personal, 21 de agosto de 2019; E. Vargas, comunicación personal, 21 de agosto de 2019) se determinó el momento de aplicación de cada plaguicida seleccionado según el cultivo, indicando que es sin cobertura del cultivo (NC) para los plaguicidas granulados y el herbicida o con cobertura del cultivo (CC) para las aplicaciones líquidas de insecticida, nematicida y fungicida.

---

<sup>1</sup> Tipo de formulación: EC (concentrado emulsionable), GR (granulado), SC (suspensión concentrada), WP (polvo mojable).

Cuadro 4. Uso agronómico seleccionado para los cuatro plaguicidas según las regiones donde fueron medidos.

Plaguicida (Acción biocida)	Región	Cultivo	FAp	DAM	TA1	Nmax	IntApl	MAp
Clorpirifos (I)	HC	Arroz	S	15	750	1	365	NC
	CO	Cebolla	S	12	1800	1	365	NC
	CO, HC	Chile dulce	S	12	1800	1	365	NC
	HC	Maíz	S	12	1800	1	365	NC
	CO	Papa	S	12	1800	1	365	NC
	HC	Piña	L	8	3840	3	60	CC
	CO	Tomate	S	12	1800	1	365	NC
Diuron (H)	HC, HN	Banano	L	6	4800	1	365	NC
	CO, HC, HN	Caña de azúcar	L	6	4800	1	365	NC
	HC, HN	Cítricos	L	3	2400	1	365	NC
	HC, HN	Maíz	L	1,5	1200	1	365	NC
	HC, HN	Piña	L	7	3360	1	365	NC
	HC, HN	Yuca	L	3,8	3040	1	365	NC
Etoprofos (N)	HC, HN	Banano	S	60	6000	1	365	NC
	HC, HN	Caña de azúcar	S	50	5000	1	365	NC
	HC, HN	Chile dulce	S	42	4200	1	365	NC
	HC, HN	Frijol	S	50	5000	1	365	NC
	HC, HN	Maíz	S	50	5000	1	365	NC
	HC, HN	Piña	L	13,6	9792	2	45	CC
	HC	Sandía	S	17	2550	1	365	NC
Metalaxil (F)	CO	Chile dulce	L	4,2	1008	2	12	CC
	CO	Papa	L	2,25	180	4		CC
	HC	Piña	L	1,2	288	3	15	CC
	HC	Sandía	L	1,5	120	4	12	CC
	CO	Tomate	L	2	160	4	14	CC

Acción biocida: I= insecticida, H= herbicida, N= nematocida, F= fungicida. Región: CO= Central Oriental, HC= Huetar Caribe, HN= Huetar Norte. FAp (forma de aplicación): L= líquido, S= sólido. DAM= dosis de aplicación máxima de producto formulado en kg/ha o L/ha. TA= tasa de aplicación del ingrediente activo en g/ha. Nmax= número máximo de aplicaciones por ciclo. Int= intervalo entre aplicaciones en días. MAp (momento y forma de aplicación): CC= con cobertura de cultivo, NC= sin cobertura de cultivo.

Los modelos de cálculo FOCUS y PWC cuentan con cultivos preestablecidos y asociados a escenarios con condiciones climáticas y formas de aplicación específicas. Se realizó una comparación entre los cultivos de Costa Rica seleccionados y los cultivos disponibles en cada modelo. Para los cultivos que no están representados en los modelos, se seleccionó al menos un cultivo que tuviera características similares como la altura y morfología de la planta, cobertura del dosel, distribución de la plantación y se utilizó todos los escenarios disponibles en el respectivo modelo para dicho cultivo (anexo 4). Para validar la similitud de cultivos se consultó un procedimiento establecido por el MINAE (UEAA, 2017) y se pidió el criterio de expertos (A. Knäbel, comunicación personal, 20 de setiembre de 2018; E. Vargas, comunicación personal, 21 de agosto de 2019).

### *Aplicación del modelo FOCUS*

Se aplicó el enfoque de FOCUS (2015) que consiste en un realismo creciente con un abordaje de cálculos simples en el nivel 1 hasta llegar a los cálculos y escenarios más detallados del nivel 3 que representan una variedad de entornos agrícolas y cultivos europeos. Se inició con el modelo *STEPS 1-2 in FOCUS* versión 1.1 para calcular las concentraciones en aguas superficiales para los niveles 1 y 2. El cálculo para el nivel 3 fue realizado con *FOCUS PRZM* versión 3.3.1, *FOCUS TOXSWA* versión 4.4.3, *SPIN* versión 2.2, integrados en la interfaz *FOCUS SWASH* versión 5.3.

Para los niveles 1 y 2, se ingresó la información de las propiedades y del uso agronómico de cada plaguicida (anexos 2, 3 y 4, cuadro 4). El modelo requiere que se indique la intercepción del cultivo<sup>2</sup>, por medio de la selección de alguna de las cuatro clases<sup>3</sup> definidas de acuerdo con el estado de crecimiento del cultivo y que determina la cantidad de plaguicida que alcanza la superficie del suelo y eventualmente, el cuerpo de agua vía escorrentía o drenaje. Se seleccionó la opción sin intercepción “*no interception*” para el herbicida y los plaguicidas granulados; mientras que en los casos donde la aplicación se realiza por encima del cultivo se seleccionó la opción de cobertura promedio “*average crop cover*”. En el caso del tipo de

---

<sup>2</sup> La intercepción del cultivo se refiere a la cantidad de plaguicida asperjado que queda en el follaje y no llega al suelo.

<sup>3</sup> Cuatro clases de intercepción: sin intercepción, cobertura mínima, cobertura intermedia y dosel completo.

cultivo, se utilizó la opción sin deriva “*no drift*” para los cultivos donde se aplican los plaguicidas granulados y la opción aplicación manual en cultivos < 50 cm “*appln hand (crop<50 cm)*” para los cultivos con aplicaciones de plaguicidas líquidos, según se muestra en el anexo 4. Como región y estación del año para la aplicación se utilizó en todos los casos la opción de “South Europe, Mar-May”, la cual representa una entrada al cuerpo de agua por escorrentía y drenaje del 4% de los residuos de plaguicida presentes en el suelo (FOCUS, 2015).

Para el nivel 3, se ingresó la información requerida de las propiedades de cada plaguicida (anexo 2 y 3). Para los datos que no estaban disponibles, se utilizó el dato por defecto que contiene el modelo. Además, se indicó el uso agronómico seleccionado como peor escenario registrado en el sistema del SFE (cuadro 4). El modelo incluye los métodos de aplicación para cada cultivo y da cinco opciones (aplicación aérea, incorporación al suelo, aplicación de granulado, aspersión dirigida al suelo y atomizador motorizado “air blast”). Se utilizó la aplicación de granulado para los cultivos asociados al uso de plaguicidas granulados y aspersión al suelo para el resto de los cultivos (FOCUS, 2015). La opción de aspersión al suelo no está disponible para los cultivos de pomo (escogido para representar banano) y cítricos, por lo que no se pudo realizar el cálculo para el uso de herbicida en estos cultivos en este nivel 3. Se utilizó las fechas de aplicación que establece el modelo para cada cultivo indicado, en los casos de múltiples aplicaciones se indicó el intervalo en días recomendado en el uso agronómico. Se hicieron los cálculos para todos los escenarios de escorrentía disponibles (R) para cada cultivo seleccionado (anexo 4).

FOCUS genera un reporte para cada cálculo, en el cual se indica los resultados de las concentraciones ambientales estimadas en distintos momentos desde la aplicación hasta 100 días después. De estos reportes se extrajo los datos de la concentración máxima anual “global max” en el agua para cada plaguicida en cada nivel. En el anexo 5 se presenta como ejemplo los reportes de clorpirifos estimado según el uso en arroz y todos los reportes generados están disponibles en el archivo digital adjunto a este documento (anexo 7).

### *Aplicación del modelo PWC*

Se utilizó el modelo PWC versión 1.5+ en un solo nivel de evaluación y con base en el cuerpo de agua estándar para este modelo. Se ingresó la información de las propiedades de cada plaguicida según se indica en los anexos 2 y 3. Se indicó el uso agronómico seleccionado como peor escenario (cuadro 4) con base en la opción del modelo que permite indicar fechas relativas. Para la mayoría de los casos no se cuenta con la información del momento de aplicación, por lo que se asumió como peor escenario que ésta se realiza el primer día desde que emerge el cultivo. Para los casos en que se cuenta con la información del momento de aplicación, se indicó el número de días después de que emerge el cultivo. Se asumió que el método de aplicación es por debajo del cultivo “*below crop*” para las aplicaciones de plaguicidas granulados y el herbicida, y por encima del cultivo “*above crop*” para aplicaciones líquidas de insecticida, nematocida y fungicida. Se escogió el valor de deriva de 0.01 y de eficiencia de 0.99, que son los valores por defecto que indica el manual de PWC para las aspersiones dirigidas al suelo (Young, 2016a). Se utilizó los escenarios disponibles para cada cultivo seleccionado (anexo 4), el archivo de clima y las diferentes variables asociadas a las características del cultivo, el terreno y el cuerpo de agua indicadas en el modelo PWC.

PWC genera un reporte para cada cálculo, en el cual se indica los resultados de las concentraciones ambientales estimadas que representa el percentil 90 del promedio diario anual estimado para distintos momentos desde la aplicación hasta 365 días después. De estos reportes se extrajo el dato de pico de la concentración ambiental estimada en la columna de agua “Peak (1-in-10 yr)” en el agua para cada plaguicida. En el anexo 6 se presenta como ejemplo el reporte de clorpirifos estimado según el uso en arroz y todos los reportes generados están disponibles en el archivo digital adjunto a este documento (anexo 7).

### *Comparación de las concentraciones estimadas y las concentraciones medidas*

Para los cuatro plaguicidas en estudio, se identificó la concentración máxima medida en cada región. Estas concentraciones se compararon con los resultados de la concentración máxima

anual de FOCUS y el pico de la concentración ambiental estimada de PWC por medio de una razón para determinar la diferencia entre éstas y si los modelos en los diferentes enfoques sobreestiman o no las concentraciones medidas en los cuerpos de agua. Se considera una sobreestimación cuando la razón es mayor a 1 y una subestimación cuando la razón es menor a 1.

Todos los gráficos fueron elaborados utilizando RStudio (R Core Team, 2018)

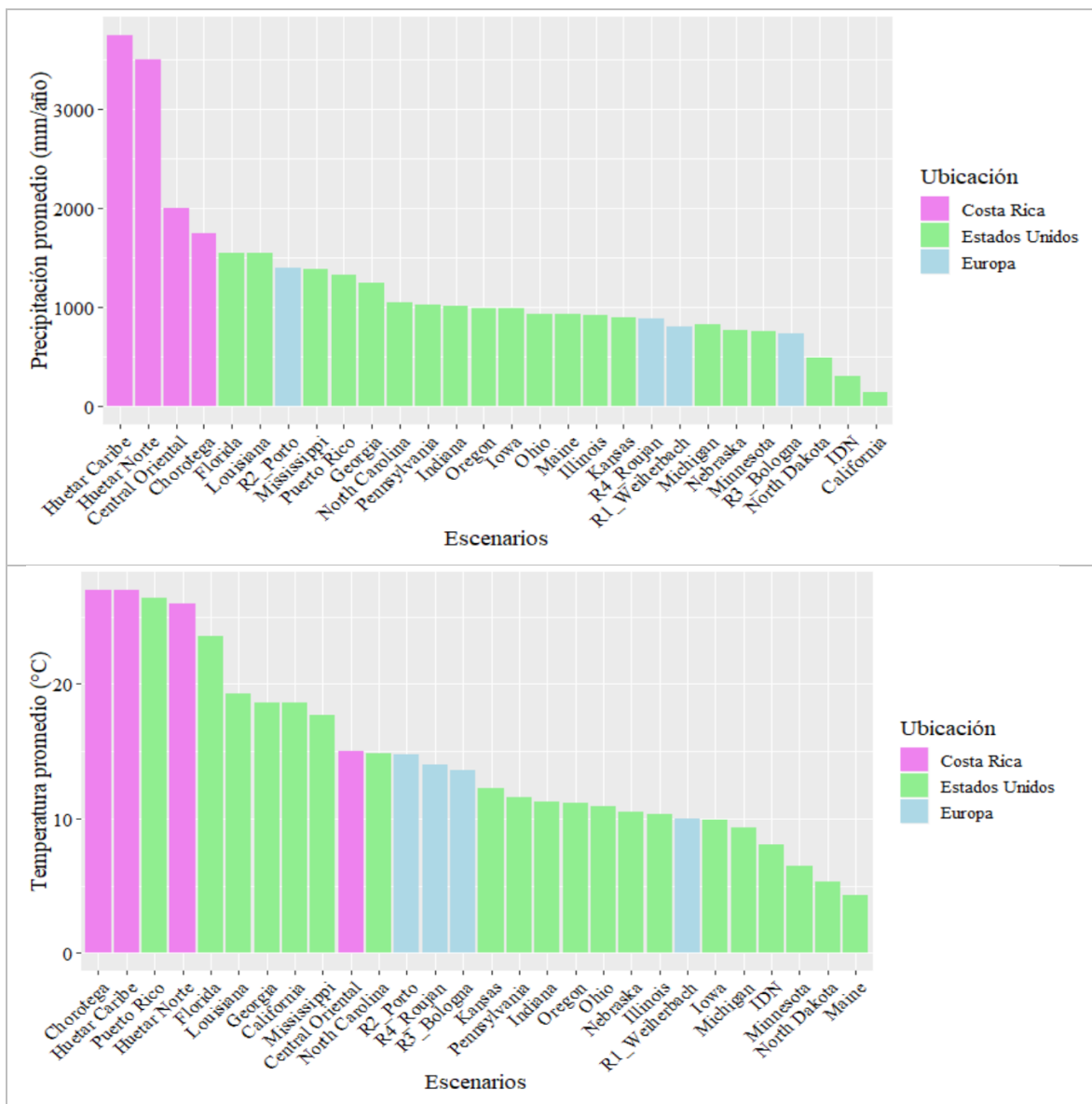
## **Resultados**

### *Descripción de los modelos FOCUS y PWC*

El cumplimiento de las condiciones para la aplicación de los modelos en Costa Rica fue del 46, 38 y 65% para FOCUS 1-2, FOCUS 3 y PWC, respectivamente. En la figura 9 se muestra que las condiciones relacionadas con los resultados se cumplen en todos los modelos, ya que todos generan un reporte donde se muestran los resultados en distintos momentos después de la aplicación, así como otros documentos donde se puede acceder a los resultados “en bruto” de todas las estimaciones. Sin embargo, solo PWC incluye en el reporte la interpretación de los procesos de destino y comportamiento ambiental del plaguicida analizado. Por otro lado, las características de los escenarios que sean similares a Costa Rica son las condiciones que no se cumplen para ningún modelo, aunque PWC sí cuenta con las posibilidades de modificar y crear escenarios, así como incluir cultivos y formas de aplicación propios de Costa Rica.

Una de las características de los escenarios es el clima, no se encontró dentro de los escenarios de FOCUS y de PWC ninguno que represente las características de Costa Rica (figura 8), por cuanto la precipitación promedio anual de las regiones estudiadas es mayor que en los escenarios de los modelos y la temperatura promedio de las regiones solo fue comparable con dos de los escenarios de PWC (Puerto Rico y North Carolina).





**Figura 8.** Precipitación y temperatura promedio en las regiones de Costa Rica y los escenarios de EUA y UE utilizados para el cálculo de las concentraciones.

*Base de datos de concentraciones ambientales de plaguicidas medidos en cuerpos de agua*

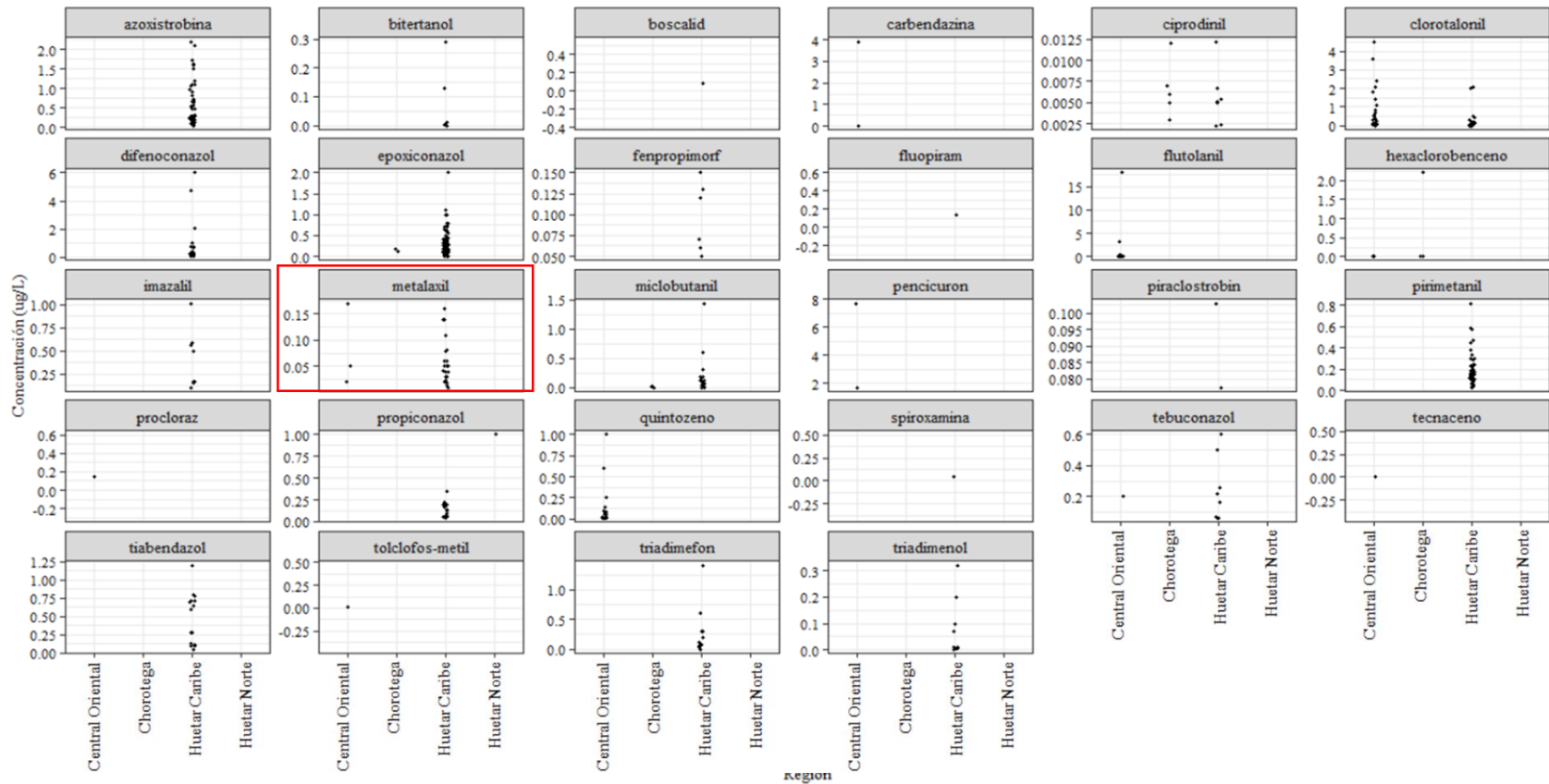
En total se obtuvo 1240 datos de concentraciones ambientales medidas de 53 plaguicidas en las regiones Huetar Caribe, Huetar Norte, Central Oriental y Chorotega. De acuerdo con la acción biocida, los plaguicidas detectados corresponden a 28 fungicidas, 10 herbicidas, 11 insecticidas y 4 nematicidas, y las concentraciones medidas para cada uno se muestran en las

figuras 10, 11, 12 y 13. Las propiedades físicas y químicas de los 53 plaguicidas detectados se presentan en el anexo 3. Esta información se presenta también en formato electrónico según se indica en el anexo 1.

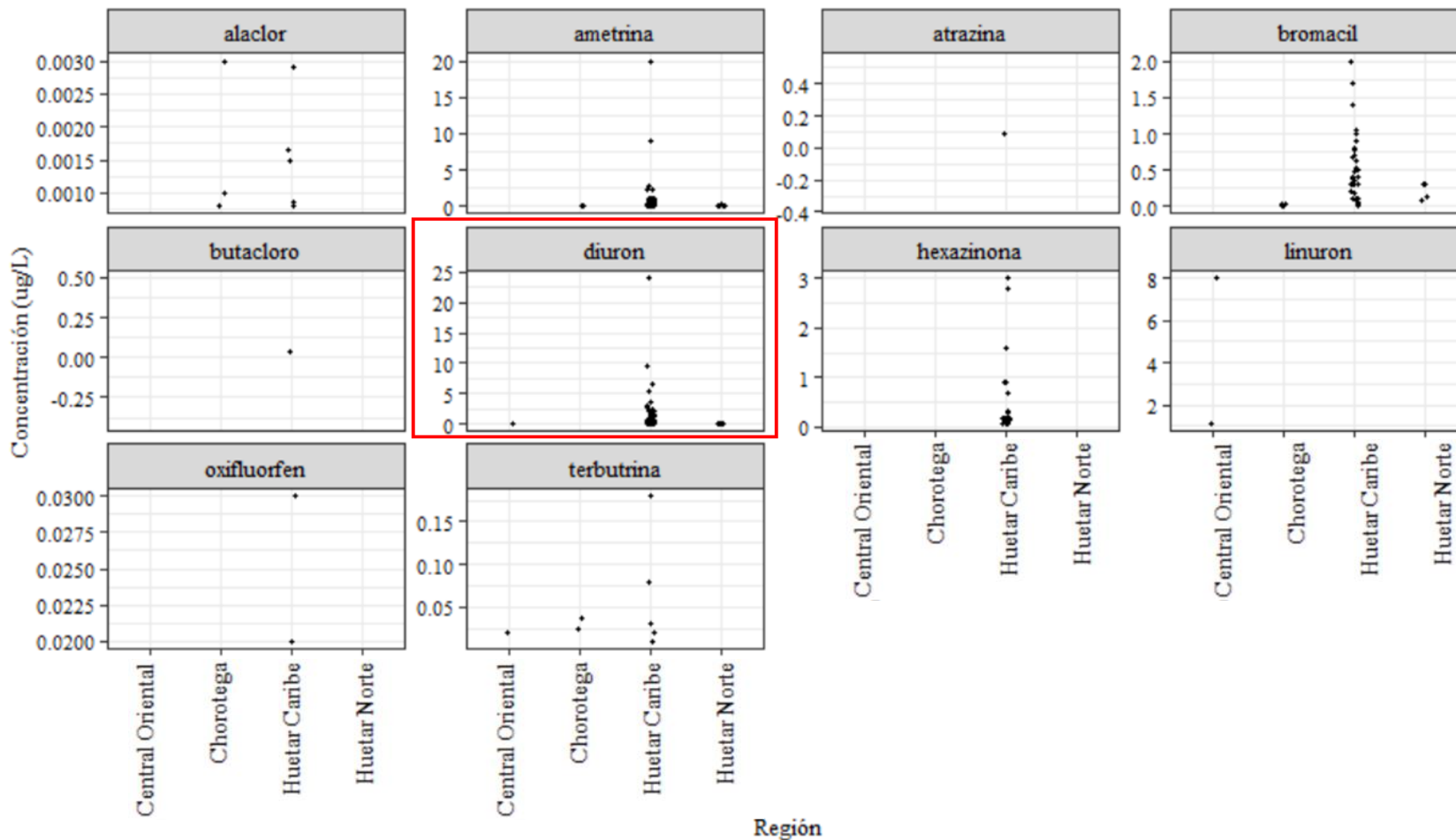
Posibilidad de indicar aplicaciones de plaguicidas a lo largo de todo el año	0	0	2
Posibilidad de hacer modificaciones de las variables de los escenarios desde la interfaz del modelo	0	0	2
Posibilidad de escoger el resultado de la concentración de plaguicida en el agua a partir de estimaciones en distintos momentos después de la aplicación	2	2	2
Posibilidad de crear nuevos escenarios representativos de las condiciones de Costa Rica para incorporarlos en el modelo	0	0	2
Opciones de métodos de aplicación de plaguicidas acordes con las prácticas agronómicas de Costa Rica	1	1	1
Interpretación de los procesos de destino y comportamiento ambiental del plaguicida analizado	0	0	2
Inclusión de los cultivos que se desarrollan en Costa Rica	1	1	1
Generación de reporte que resuma los resultados obtenidos	2	2	2
Estimaciones basadas en escenarios que no son específicos para ninguna condición de clima, región y práctica agronómica	2	0	0
Escenarios disponibles con cuerpos de agua similares a los de Costa Rica	0	1	0
Escenarios disponibles con clima similar al de Costa Rica	0	0	0
Datos de propiedades físico-químicas requeridos están disponibles en las solicitudes de registro	2	1	1
Acceso a los resultados "en bruto" de todas las estimaciones realizadas por el modelo	2	2	2
	FOCUS 1-2	FOCUS 3	PWC
	Modelo		

Puntaje  
 2  
 1  
 0

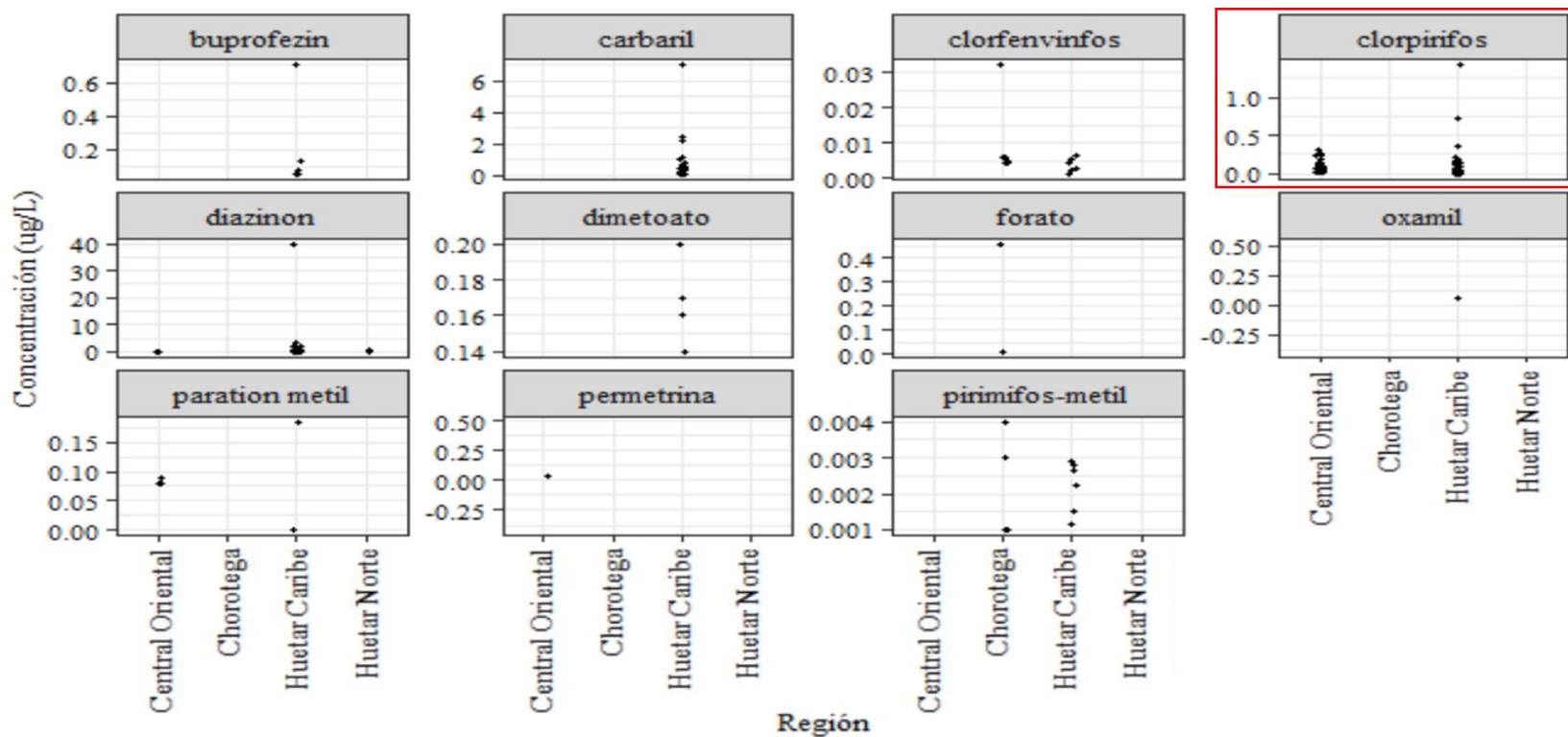
**Figura 9.** Puntaje de cumplimiento de las características de los escenarios, datos de entrada y resultados de los modelos FOCUS y PWC. Puntaje: 0: no se cumple la condición, 1: la condición se cumple parcialmente y 2: la condición se cumple completamente.



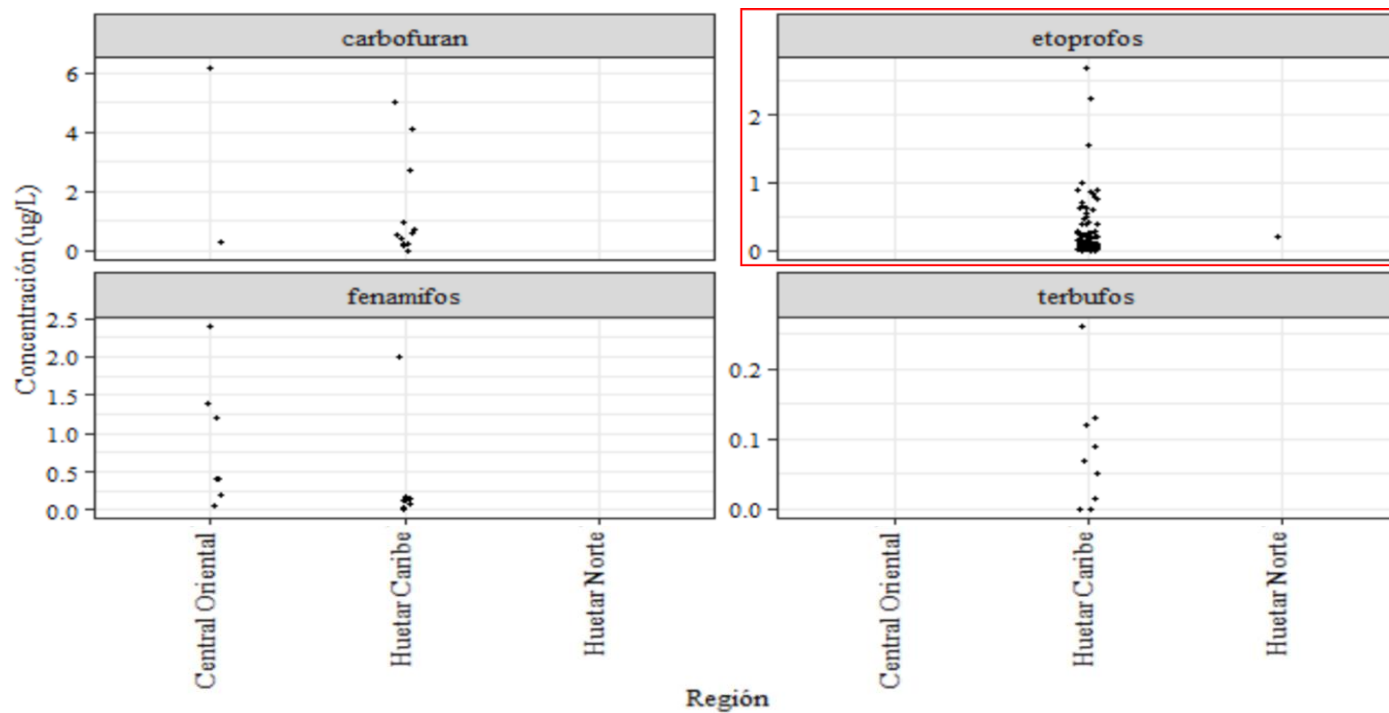
**Figura 10.** Concentraciones medidas de fungicidas en cuerpos de agua de cuatro regiones de Costa Rica. Se remarca en rojo el metalaxil que fue seleccionado para el cálculo de la concentración ambiental estimada con los modelos FOCUS y PWC. Fuentes: Fournier et al, 2010, Mena et al, 2014, Echeverría-Sáenz et al, 2012; Diepens et al, 2014; Arias-Andrés et al, 2018; Echeverría-Sáenz et al, 2018; Polidoro & Morra, 2016; Rämö et al, 2018, Fournier et al, 2018, Dirección de Agua, 2018.



**Figura 11.** Concentraciones medidas de herbicidas en cuerpos de agua de cuatro regiones de Costa Rica. Se remarca en rojo el diuron que fue seleccionado para el cálculo de la concentración ambiental estimada con los modelos FOCUS y PWC. Fuentes: Fournier et al, 2010, Mena et al, 2014, Echeverría-Sáenz et al, 2012; Diepens et al, 2014; Arias-Andrés et al, 2018; Echeverría-Sáenz et al, 2018; Polidoro & Morra, 2016; Rämö et al, 2018, Fournier et al, 2018, Dirección de Agua, 2018.



**Figura 12.** Concentraciones medidas de insecticidas en cuerpos de agua de cuatro regiones de Costa Rica. Se remarca en rojo el clorpirifos que fue seleccionado para el cálculo de la concentración ambiental estimada con los modelos FOCUS y PWC. Fuentes: Fournier et al, 2010, Mena et al, 2014, Echeverría-Sáenz et al, 2012; Diepens et al, 2014; Arias-Andrés et al, 2018; Echeverría-Sáenz et al, 2018; Polidoro & Morra, 2016; Rämö et al, 2018, Fournier et al, 2018, Dirección de Agua, 2018.



**Figura 13.** Concentraciones medidas de nematocidas en cuerpos de agua de cuatro regiones de Costa Rica. Se remarca en rojo el etoprofos que fue seleccionado para el cálculo de la concentración ambiental estimada con los modelos FOCUS y PWC. Fuentes: Fournier et al, 2010, Echeverría-Sáenz et al, 2012; Diepens et al, 2014; Arias-Andrés et al, 2018; Echeverría-Sáenz et al, 2018; Polidoro & Morra, 2016; Rämö et al, 2018, Fournier et al, 2018, Dirección de Agua, 2018.

### *Concentraciones ambientales estimadas con FOCUS*

Se realizó 50 cálculos con el modelo “STEPS 1-2 in FOCUS”, 25 en el nivel 1 y 25 en el nivel 2. En el nivel 3 con los modelos integrados en la interfaz “FOCUS SWASH” se realizó 98 cálculos. La figura 14 muestra que nivel 1 y 2 sobreestimaron las concentraciones ambientales en todos los casos (100%). Las estimaciones con FOCUS 1 son entre 8 - 40000 veces más altas que las concentraciones medidas en el ambiente y entre 3 - 16000 para FOCUS 2, mientras que FOCUS 3 sobreestimó las concentraciones ambientales entre 0.002 - 4500 veces y también tuvo un 25% de subestimaciones para clorpirifos en las regiones CO y HC, diuron en la región HC y etoprofos en las regiones HC y HN.

En FOCUS 3 hubo al menos un escenario para cada cultivo utilizado en los que las estimaciones fueron muy cercanas a la concentración máxima medida (concentración estimada/concentración medida < 10). Con excepción de los cultivos de banano y cítricos para los cuales no se realizó la estimación debido a que el modelo no cuenta con un escenario para este nivel para el uso de herbicidas en cultivos de árboles.

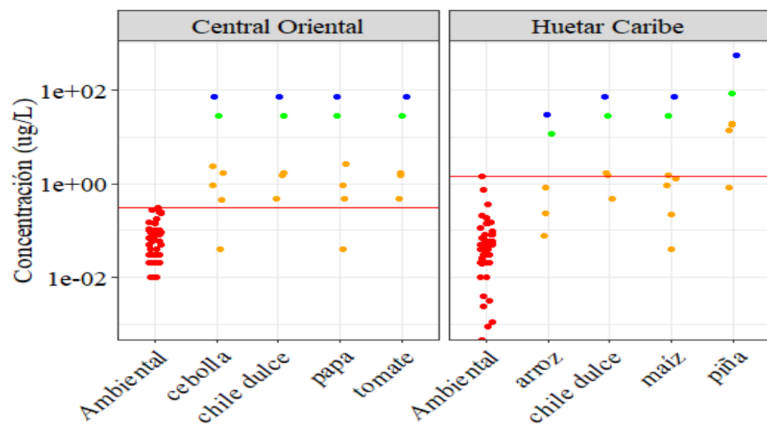
### *Concentraciones ambientales estimadas con PWC*

Se realizó 65 cálculos con el modelo PWC. La figura 15 muestra que PWC estimó el 17% por debajo de las concentraciones ambientales, específicamente para el diuron en la región Huetar Caribe en donde solo la estimación para caña de azúcar estuvo por encima de la concentración máxima medida en esa región. El otro 83% corresponde a estimaciones que fueron entre 1.2 y 1900 veces más altas que el valor de concentración máxima medida en cada región para los cuatro plaguicidas.

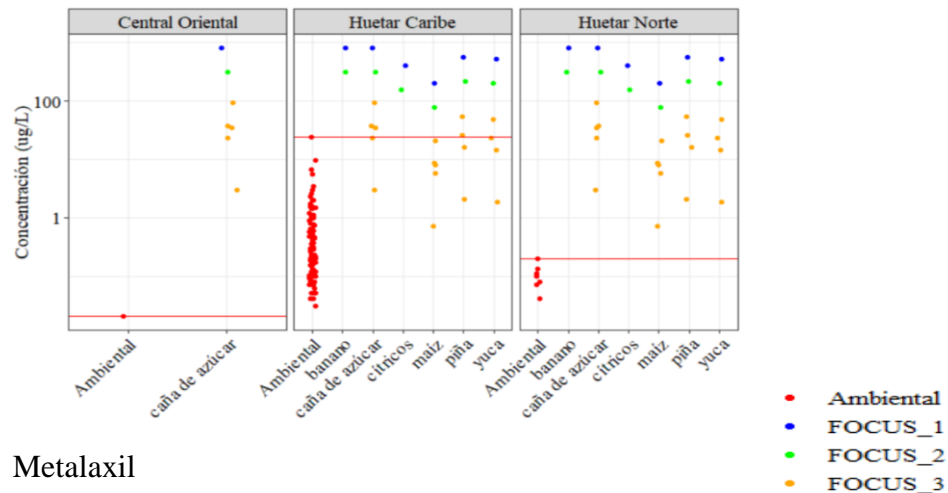
Para todos los cultivos excepto caña de azúcar, hubo escenarios en los que las estimaciones fueron muy cercanas a la concentración máxima medida (concentración estimada/concentración medida < 10).



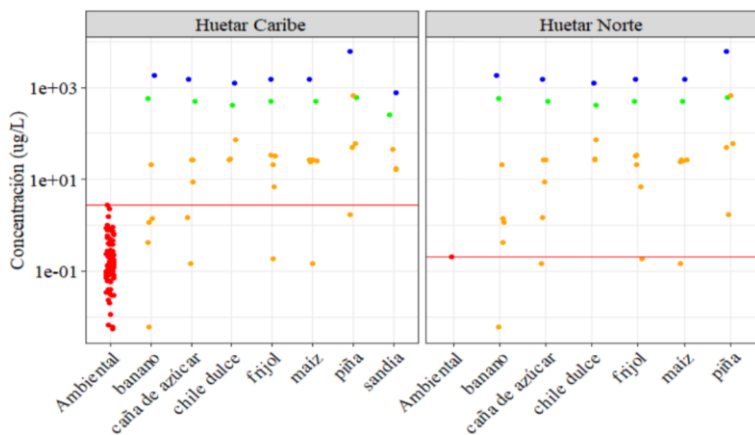
### Clorpirifos



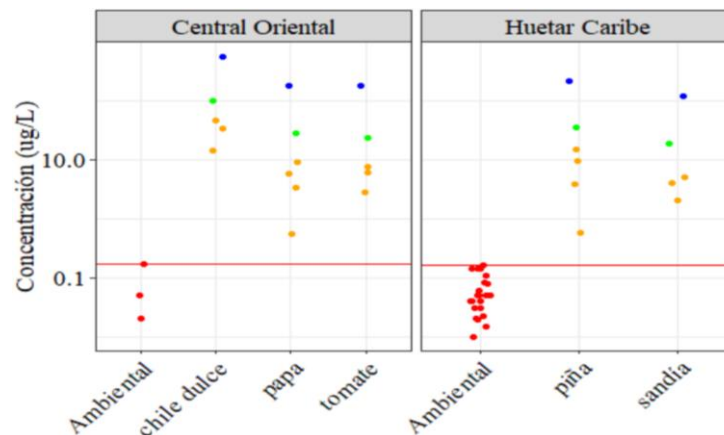
### Diuron



### Etoprofos

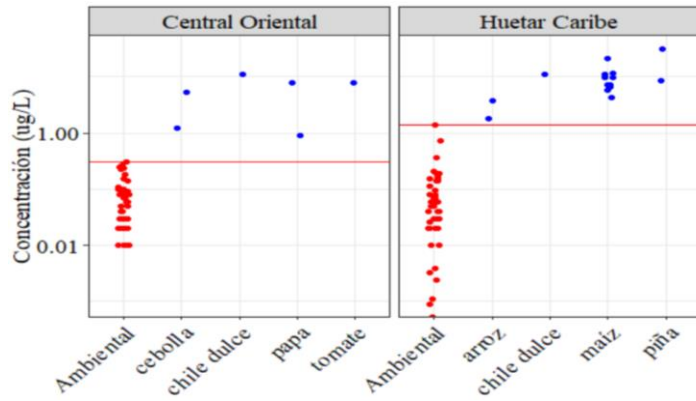


### Metalaxil

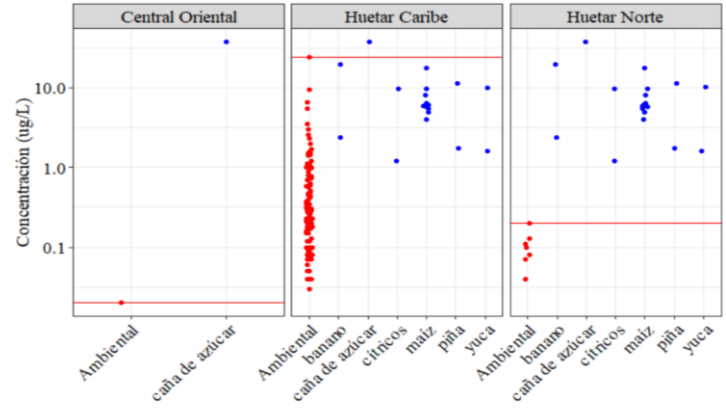


**Figura 14.** Concentraciones de cuatro plaguicidas ( $\mu\text{g/L}$ ) estimadas con los modelos FOCUS en los tres niveles, en comparación con las concentraciones medidas ( $\mu\text{g/L}$ ). Los puntos rojos corresponden a las concentraciones medidas de cada plaguicida en cada región y la línea roja representa el valor máximo de estas concentraciones. Los puntos azules, verdes y anaranjados corresponden a las concentraciones ambientales estimadas por FOCUS 1, 2 y 3, respectivamente, para cada plaguicida en cada cultivo.

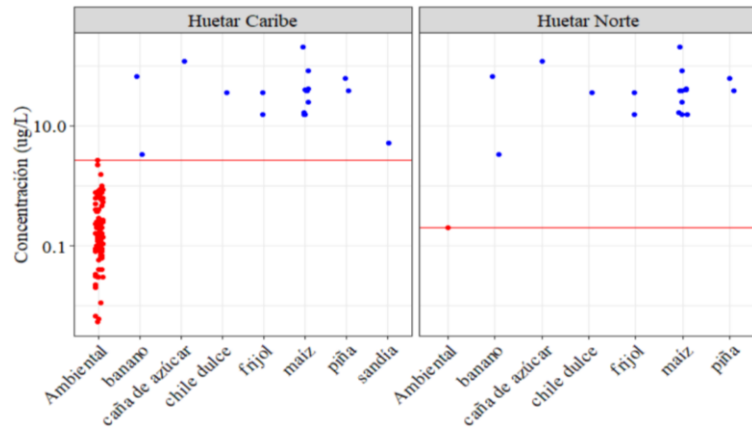
### Clorpirifos



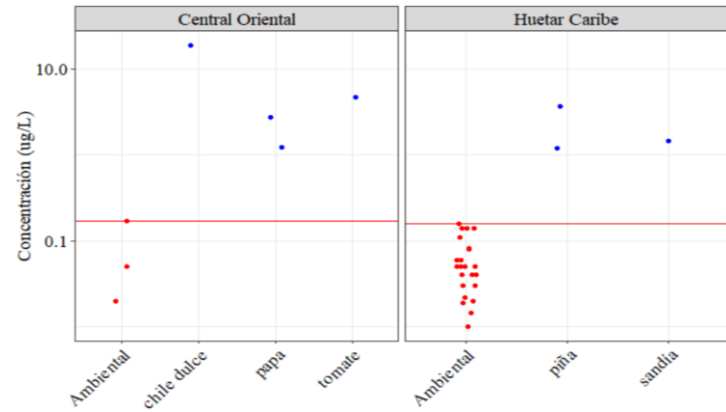
### Diuron



### Etoprofos



### Metalaxil



• Ambiental  
• PWC

**Figura 15.** Concentraciones de cuatro plaguicidas ( $\mu\text{g/L}$ ) estimadas con el modelo PWC, en comparación con las concentraciones medidas ( $\mu\text{g/L}$ ). Los puntos rojos corresponden a las concentraciones medidas de cada plaguicida en cada región y la línea roja representa el valor máximo de estas concentraciones. Los puntos azules corresponden a las concentraciones ambientales estimadas por PWC para cada plaguicida en cada cultivo.

## **Discusión**

Los elementos de este estudio se discuten a continuación, iniciando con los hallazgos en los datos de las concentraciones ambientales medidas, para posteriormente comentar los retos y oportunidades que tienen los modelos FOCUS y PWC desde la descripción de sus características y la comparación de sus resultados con respecto a las concentraciones ambientales medidas y concluir con la valoración de su aplicación en el sistema de registro de Costa Rica.

Los datos de concentraciones ambientales medidas utilizados en este estudio fueron obtenidos principalmente de las investigaciones del IRET, de las cuales 6 fueron desarrolladas en la región Huetar Caribe, y una en cada una de las regiones Huetar Norte, Chorotega y Central Oriental, por lo tanto la mayoría de los datos provienen de la región Huetar Caribe. Además, en el 66% de los plaguicidas reportados, el número de veces que se midió fue menor a 20. Esto provocó que se escogieran cuatro plaguicidas de manera que representaran los diferentes tipos de acción biocida, dejando de lado las propiedades físico-químicas que es un factor relevante dentro de las estimaciones de los modelos. Estos resultados permitieron identificar que es necesario contar con más datos y de todas las regiones agrícolas del país para mejorar el diseño de este tipo de investigaciones de comparación de datos de campo con estimaciones teóricas.

Con respecto a las características de los modelos de cálculo de exposición acuática, el análisis se enfocó en conocer si hay condicionantes que hacen que los resultados obtenidos para los usos de plaguicidas en Costa Rica, estén por debajo de las concentraciones que se han medido en el ambiente donde estas sustancias se aplican. El uso de modelos que arrojan estas subestimaciones, supondría que las decisiones que se toman al momento del registro de un plaguicida, están asumiendo menos carga química de la que realmente ocurre. Esto por cuanto el uso de los modelos de exposición acuática son una parte de la evaluación de riesgo ambiental que se realiza en este proceso de registro que busca tomar una decisión para prevenir los riesgos ambientales asociados al uso de plaguicidas. En el anexo 8 se detalla la forma en que se toma la decisión con base en la evaluación de riesgo ambiental utilizando los modelos de cálculo de exposición.

El uso de modelos predictivos de la exposición tiene muchas ventajas, pero debe tenerse en cuenta la incertidumbre propia del diseño y de la información utilizada. Conocer las características y limitaciones de cada uno de los modelos de cálculo de la exposición es un aspecto crítico al momento de elegir qué herramienta utilizar en el proceso de registro de los plaguicidas. Esto es de especial relevancia para países como Costa Rica (y la región de América Latina) donde no se ha desarrollado un modelo que contemple sus condiciones específicas (Carrquiriborde *et al*, 2014), lo que lleva a utilizar los modelos que han sido desarrollados para los Estados Unidos y la Unión Europea, como principales referentes en esta labor. Al realizar este análisis, no debe perderse de vista que los modelos de cálculo utilizados con fines regulatorios tienen un propósito diferente que los modelos de investigación, que a menudo se esfuerzan por una estimación precisa en un sitio de campo específico. Los modelos regulatorios, por el contrario, tienden a ser más simples y tienen un nivel apropiado de conservadurismo incorporado (Young, 2019). Así mismo, es importante recalcar que el uso de modelos de cálculo de exposición acuática es solo una parte de la evaluación de riesgo, y que los resultados de estos modelos deben compararse con los valores de toxicidad del plaguicida, para finalmente completar la evaluación de riesgo (Knäbel *et al*, 2014; Boivin & Poulsen, 2017).

Quizás la principal limitante de los modelos FOCUS y PWC analizados en este estudio, es que los escenarios incluidos corresponden a regiones templadas donde las características del clima y de la agricultura son muy distintas a las del trópico, y por ende también la forma en que se aplican los plaguicidas en campos agrícolas. Aun así, ambos sistemas presentan alternativas para que puedan ser utilizados en la evaluación de exposición acuática en el proceso de registro de plaguicidas para Costa Rica, siempre que no se pierda de vista las limitaciones.

Por un lado, FOCUS presenta una serie de herramientas con un enfoque por niveles que, si bien en los niveles superiores tiene escenarios específicos para zonas y cultivos con las condiciones europeas (nivel 3), también cuenta con la herramienta STEPS 1-2 que no es específica para ningún tipo de clima, región o cultivo. De esta forma, esta herramienta resulta útil para realizar los cálculos iniciales en una evaluación de riesgo acuático y solo en casos donde el riesgo resulte inaceptable, será necesario buscar alternativas de refinamiento. Los

resultados de este estudio muestran que las estimaciones con FOCUS 1 y 2, están muy por encima de las concentraciones medidas en el ambiente, con un rango entre 8 - 40000 más alto para FOCUS 1 y entre 3 - 16000 veces más alto para FOCUS 2.

Dentro de las limitaciones que presenta STEPS 1-2 está que tiene una lista de selección de cultivos que se desarrollan en Europa únicamente. Esta fue una de las limitantes encontradas con los cultivos de caña de azúcar, piña y banano, que son cultivos que no se desarrollan en UE y por lo tanto no están incluidos en el modelo. El procedimiento de evaluación de riesgo del MINAE contempla esta limitación y se realizó un ajuste con el fin de que los parámetros desarrollados para los cultivos europeos coincidan con los cultivos que se dan en Costa Rica (UEAA, 2017). Este mismo enfoque fue utilizado en este estudio para esos cultivos.

Además, los cálculos se realizan para el periodo de una estación climática (primavera, invierno, otoño o verano), según la selección del usuario. Esto tiene una afectación en el número y el momento de las aplicaciones de plaguicidas, que se utilizan como datos de entrada para el modelo. La producción agrícola en Costa Rica es muy diferente a la de los países templados, lo cual tiene gran relación con el clima, de manera que en Costa Rica hay una serie de cultivos que tienen más de un ciclo al año, mientras que en UE se cultiva por estaciones climáticas. Estas diferencias en el clima tienen influencia en el comportamiento de los plaguicidas en el ambiente, algunos datos sugieren que las tasas de degradación podrían ser más altas en los países tropicales debido a las altas temperaturas y la luz solar, mientras que otros estudios muestran que la toxicidad puede aumentar con el aumento de las temperaturas (Castillo, De la Cruz y Ruepert, 1997). Por otro lado, en Costa Rica hay cultivos perennes o de ciclos de hasta dos años en los que se da la aplicación de plaguicidas de manera intensiva a lo largo del año, como por ejemplo los cultivos de banano y piña en la región Huetar Caribe (Arias-Andrés, 2018; Echeverría-Sáenz, 2018). Para simplificar el proceso, en este estudio se utilizó solo un ciclo para cada cultivo y se utilizó los momentos de aplicación (fechas) que están incluidos en los modelos según el cultivo seleccionado.

Con FOCUS 1 y 2 no se obtuvo subestimaciones con respecto a la contaminación real en el campo, con lo cual logra el objetivo de los modelos para uso en el registro de plaguicidas. Esto es especialmente importante considerando que se ha argumentado que el enfoque de modelado FOCUS solo es válido para el proceso de registro de plaguicidas en la UE porque

los ajustes agrícolas y climáticos son específicos para los países europeos. Sin embargo, esta declaración no es relevante para los pasos 1 y 2 de FOCUS porque estos no están asociados a un escenario real (Knäbel *et al*, 2014). Estas afirmaciones respaldan la decisión de la DIGECA de adoptar únicamente el modelo STEPS 1-2 en su metodología (UEAA, 2017).

Sin embargo, se mantiene un vacío con respecto a los pasos a seguir cuando se requiere un refinamiento del cálculo de la exposición, ya que los escenarios para los siguientes niveles en FOCUS utilizando la herramienta SWASH están previamente definidos y son representativos de diez regiones de la UE, que es muy específico para las características de clima y de cultivos de dichas regiones. Aunque se pueden hacer modificaciones a los datos que define cada escenario, no es posible incluir escenarios adicionales lo cual representa una limitación para el uso de este modelo fuera de la UE.

En ese sentido, al pasar al nivel 3 de FOCUS, se obtuvo valores estimados cada vez menores, hasta un 25% de estimaciones que estuvieron por debajo de las concentraciones ambientales encontradas en la región Huetar Caribe. Estos resultados son coincidentes con los hallados por Knäbel *et al* (2014), quienes han criticado que las predicciones de FOCUS subestiman las concentraciones de fungicidas e insecticidas en campo, lo cual es inapropiado pues se subestiman igualmente los riesgos ambientales. Estos autores han demostrado la falta de protección y de la calidad de las predicciones de FOCUS para insecticidas y fungicidas autorizados en UE, con respecto a los datos de mediciones en campo. Santos Pereira *et al* (2017), evaluaron la predictividad de los escenarios de FOCUS 3, comparando las concentraciones medidas de plaguicidas en un cuerpo de agua de un área de cultivo del Mediterráneo con las concentraciones estimadas por el modelo y encontraron claras diferencias, que indican una posible inexactitud de las herramientas predictivas utilizadas en la regulación de la UE.

Es importante señalar que en el caso del uso de diuron en cultivos de cítricos y banano, no se calculó las concentraciones estimadas con FOCUS 3. FOCUS (2015) advierte sobre el problema que surge al querer evaluar el riesgo tras el tratamiento con herbicidas en cultivos arbóreos, ya que la interfaz SWASH no prepara toda la información necesaria y se requiere que el usuario edite o cambie algunos datos de entrada. Este proceso requiere de un mayor

conocimiento de la herramienta y deja de ser un análisis de nivel 3, razón por la cual no fueron calculados estos datos.

En FOCUS 3 se asume que la deposición de plaguicidas por deriva depende del método de aplicación (FOCUS, 2015). Por lo tanto, se debe tomar en cuenta las diferencias en los métodos de aplicación de plaguicidas que se utilizan en Costa Rica y los que permite indicar el modelo, que en el nivel 3 da cinco opciones: aplicación aérea, incorporación al suelo, aplicación de granulado, aspersión dirigida al suelo y atomizador motorizado “air blast”. Sin embargo, los métodos de aspersión dirigida al suelo y atomizador motorizado están vinculados a cultivos específicos y no se pueden intercambiar.

Con respecto al modelo PWC, la EPA utiliza una sola herramienta que no tiene delimitados los niveles de evaluación, sino que está abierta para que el usuario defina sus pasos de refinamiento (Young, 2016). En ese sentido, el PWC tiene escenarios estándar para distintas regiones de los EUA y para cada cultivo desarrollado en la región. Aunque las características de los cultivos y del clima están previamente establecidas, están a la vista del usuario en la interfaz del programa, lo que permite que se realicen ajustes a los datos para casos específicos, y se pueden también crear y manipular nuevos escenarios para condiciones propias, siempre y cuando se cuente con los insumos necesarios para ingresar en el sistema, como son los archivos del clima, descriptores de crecimiento del cultivo, factores hídricos, características de irrigación, perfiles del suelo (Young, 2016a).

Si bien la libertad que presenta el PWC para ingresar y modificar fácilmente los datos requeridos por el modelo, representa una oportunidad para adoptar y adaptar los escenarios a condiciones específicas de Costa Rica, también se convierte en un reto para la implementación del modelo dentro del sistema de registro. Esto por cuanto debe estandarizarse las características de cada nuevo escenario y tener debidamente respaldado cualquier cambio que se implemente, con el fin de reducir la subjetividad en la toma de decisiones. Además, PWC requiere de más de datos de entrada (anexo 2), por lo que si se busca un primer nivel sencillo, esto no es posible con este modelo.

Con el modelo PWC se obtuvo un 17% de subestimaciones en el presente estudio, únicamente para el herbicida diuron en la región Huetar Caribe. Sin embargo, la comparación con las concentraciones medidas de este plaguicida en la región Huetar Norte, donde los

cultivos sembrados son similares a la región Caribe, muestran que las estimaciones están por encima de los valores medidos en el ambiente. Arias-Andrés *et al* (2018) concluyeron que las concentraciones encontradas en la región Huetar Caribe son de alto riesgo ambiental. Esta situación puede presentarse en otras zonas del país con características similares de precipitación y escorrentía, lo que resalta la relevancia de aumentar los esfuerzos del monitoreo ambiental de los cuerpos de agua en las zonas agrícolas de todo el país.

Otros investigadores han comparado los resultados de PWC con mediciones ambientales. Rumschlag, Bessler, & Rohr (2019) obtuvieron resultados de concentraciones máximas medidas en sistemas lénticos que excedieron los PEC para el 31.3% de los herbicidas y 41.7% de insecticidas, sugiriendo que el modelo no describe los peores escenarios de exposición en sistemas lénticos. Huff Hartz *et al* (2017) también encontraron subestimaciones de teflutrina y clotianidina con el modelo PWC en comparación con las concentraciones observadas en agua de escorrentía superficial. Xie *et al* (2018) concluyeron que el uso de este cuerpo de agua de estanque estándar en el modelo de exposición fue capaz de proporcionar una estimación conservadora pero realista de las concentraciones (es decir, en un orden de magnitud mayor que los datos de monitoreo del peor escenario) para la evaluación de la exposición reglamentaria a nivel inicial en entornos agrícolas de California.

Las diferencias en el clima que presentan ambos modelos no solo afectan los aspectos agronómicos, sino que también influyen en el destino de los plaguicidas, de ahí que los escenarios europeos tengan la temperatura promedio anual y precipitación anual dentro de las principales propiedades que los diferencian (FOCUS, 2015). Así mismo, en un estudio en la región Huetar Caribe de nuestro país, se concluyó que la precipitación, la cantidad de escorrentía, las pendientes, la cobertura vegetal y si el uso de los plaguicidas fue reciente o no, son más determinantes en las cargas de plaguicidas, que las características fisicoquímicas de cada sustancia (Vargas y Saravia, 2013). Con base en esto, no se encontró dentro de los escenarios de FOCUS y de PWC ninguno que represente las características de Costa Rica con respecto a la precipitación. La alta precipitación podría provocar que la escorrentía superficial y la erosión del suelo lleven más plaguicidas hacia los cuerpos de agua en Costa Rica (P. Adriaanse, comunicación personal, 13 de setiembre de 2019). Por otro lado, las mayores temperaturas podrían incidir en una degradación más rápida del plaguicida (Racke



*et al*, 1997). Con esto se evidencia que estos modelos no cuentan con un escenario realista que sea representativo de las condiciones climáticas y agrícolas de Costa Rica así como datos de la destino ambiental de plaguicidas en ambientes tropicales.

A pesar de esto, con el uso de estos modelos se obtuvo que la mayoría de las concentraciones ambientales estimadas para los cuatro plaguicidas estudiados fueron más altas que las concentraciones ambientales medidas en los estudios. Además, si se considera que un orden de magnitud es una diferencia que demuestra estimaciones realistas (Xie *et al*, 2018), FOCUS 3 y PWC proveen resultados dentro de este rango para cada cultivo evaluado (figuras 14 y 15). Sin embargo, los datos de concentraciones medidas corresponden a muestreos puntuales y no necesariamente representan la concentración más alta que se pueda encontrar de dicho plaguicida en los cuerpos de agua cercanos a plantaciones agrícolas. Por ejemplo, Vargas y Saravia (2013), observaron que, durante una crecida, la concentración de plaguicidas tuvo una relación directa con el aumento del caudal y una aplicación del plaguicida reciente, incrementándose en un factor de 3 para el diurón, un factor 4 para el etoprofos, un factor 3 para el clorpirifos y en un factor 2 para el diazinón con respecto a la concentración basal del plaguicida en un cuerpo de agua de la región Huetar Caribe.

Stehle y Schulz (2015) llaman la atención sobre tres aspectos que deben considerarse con el uso de datos de monitoreo para la evaluación de riesgo de insecticidas: primero, los resultados de monitoreo de insecticidas publicados probablemente subestiman los niveles de exposición reales porque es extremadamente difícil capturar concentraciones pico de insecticidas transitorios; en segundo lugar, los efectos generales de los plaguicidas en el campo están impulsados por picos de exposición repetitivos y toxicidad de mezcla; en tercer lugar, es probable que ocurran efectos ecológicos inaceptables en los organismos acuáticos en el campo a concentraciones muy por debajo de la RTL (niveles de umbral regulatorio aceptados). Por lo tanto, es necesario que se actualice el Plan Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos de Agua Superficiales, tomando en consideración no solo plaguicidas organoclorados y organofosforados, sino con base en los plaguicidas que están autorizados para los cultivos que se siembran en cada región de estudio; esto permitiría tener datos post-registro para hacer una evaluación de riesgo y reconsiderar las autorizaciones de uso otorgadas.

Otro aspecto a considerar, es que se utilizó como resultado del cálculo los datos de concentraciones de exposición máximos (PEC max) que representan el momento cuando se midió el valor más alto dentro del modelaje. Este es el dato que se recomienda para las evaluaciones de riesgo ambiental agudo en los procesos de registro de plaguicidas, con lo cual se garantiza un análisis protector del ambiente acuático basado en el enfoque del peor escenario (EPA, 1992; FOCUS, 2015). Sin embargo, este nivel de protección está relacionado con los datos de las concentraciones medidas en el campo, las cuales no están asociadas a incidentes específicos de contaminación que podrían llevar a picos más altos de concentraciones ambientales. En general, existen diferencias entre la situación del campo y los escenarios de agua superficial de FOCUS que podrían influir en las relaciones de la simulación y las concentraciones medidas en campo. En la mayoría de los casos, los cuerpos de agua reales son más grandes que los cuerpos de agua FOCUS, lo que resulta en una sobreestimación de las concentraciones de campo reales. Además, el tamaño del campo adyacente (o captación aguas arriba) y el tiempo entre la aplicación y la primera lluvia influyen en la cantidad de plaguicidas que entran en el cuerpo de agua debido a la escorrentía o el drenaje (Knäbel *et al*, 2014).

Para realizar esta labor de verificación de la aplicabilidad de los modelos de cálculo de exposición con respecto a los datos de campo, se requiere de mayor cantidad de datos de los plaguicidas, en las distintas regiones del país donde estos son aplicados. Para determinar qué tan bien predicen las concentraciones estimadas máximas a las concentraciones máximas de contaminantes en el campo, se debe tener en cuenta su variabilidad, y esto es una función del esfuerzo de muestreo, definido como la cantidad total de veces que se examina un plaguicida en diferentes ubicaciones y en el tiempo (Rumschlag, Bessler, & Rohr, 2019).

También, es importante considerar que los datos de monitoreo tienen limitaciones relacionadas con el momento de muestreo, que usualmente no se realizan inmediatamente después de las aplicaciones de plaguicidas (cuando se espera que ocurran las entradas más altas por deriva), o después de eventos de lluvia (cuando generalmente ocurren las entradas por escorrentía o drenaje). Aun así, esta información resulta útil para compararla con los valores regulatorios durante el proceso de aprobación o para revisar las autorizaciones de uso

(Knauer, 2016; Santos Pereira *et al*, 2017), así como para validar la predicción que hacen los modelos de exposición.

## **Conclusiones**

Los modelos de cálculo de exposición FOCUS y PWC han sido desarrollados como parte de la evaluación de riesgo ambiental para el registro de plaguicidas en Europa y Estados Unidos. Para evaluar su aplicabilidad en el sistema de registro de Costa Rica fue necesario conocer las características y limitaciones de cada uno de estos modelos:

- La principal limitante es que los escenarios incluidos corresponden a regiones templadas donde las características del clima y de la agricultura son muy distintas a las del trópico.
- FOCUS STEPS 1-2 no es específico para ningún tipo de clima, región o cultivo y requiere pocos datos de entrada, por lo que es aplicable en los primeros niveles de la evaluación de riesgo acuático en el sistema de registro de Costa Rica.
- FOCUS 3 tiene diez escenarios que son específicos para las características de clima, cultivos y métodos de aplicación de plaguicidas de las regiones de la UE. Se pueden hacer modificaciones a los datos que define cada escenario para adaptarlos a las condiciones de Costa Rica, pero no es posible incluir escenarios adicionales.
- PWC tiene escenarios estándar para distintas regiones de los EUA y para cada cultivo desarrollado en la región. La interfaz permite que realizar ajustes a los datos, así como crear y manipular nuevos escenarios, por lo que el modelo que presenta más oportunidades para desarrollar escenarios propios de Costa Rica y realizar el cálculo de la exposición acuática en condiciones más realistas.

La comparación de los resultados de los modelos con las concentraciones ambientales medidas demostró que FOCUS en los niveles 1 y 2 hace una predicción protectora del ambiente acuático para las condiciones evaluadas, aunque los resultados se alejan de las concentraciones ambientales reales. Con FOCUS 3 y PWC hubo escenarios en los que las estimaciones fueron muy cercanas a la concentración máxima medida y también hubo varias subestimaciones, lo cual sugiere que: 1) los escenarios utilizados no son apropiados y es

necesario hacer adaptaciones para contar con escenarios que representen las condiciones del clima y de los cultivos de Costa Rica y; 2) los datos de las concentraciones ambientales medidas son insuficientes para este tipo de comparación y no están directamente relacionados con las condiciones de uso de plaguicidas que se están estimando con los modelos.

En resumen, tanto FOCUS como PWC presentan retos y oportunidades para su aplicación en Costa Rica, siendo FOCUS en los niveles 1 y 2 la herramienta que puede utilizarse en los primeros niveles de la evaluación y FOCUS 3 y PWC para el refinamiento a niveles superiores, con las respectivas adaptaciones a las condiciones locales. Por otra parte, PWC es el modelo que muestra más oportunidades para contar con una herramienta ajustada a los cultivos y condiciones de Costa Rica, pero requiere de la recopilación de datos sobre el crecimiento de los cultivos, características del paisaje y los cuerpos de agua, así como archivos de clima que cumplan con el formato requerido.

## **Recomendaciones**

Para la investigación:

- Considerar el modelo PWC para el desarrollo de nuevos escenarios representativos de las condiciones de Costa Rica. Se recomienda seguir los siguientes pasos:
  - Identificar las variables de peso que influyen en los resultados de la estimación de concentraciones ambientales. Se deben incluir aspectos del crecimiento del cultivo, propiedades del suelo, clima, hidrología.
  - Seleccionar los cultivos o escenarios clave para desarrollar nuevos escenarios con condiciones más realistas para Costa Rica, para garantizar la protección ambiental de los sistemas acuáticos asociados, como podrían ser los cultivos de piña, banano, caña de azúcar, arroz, café, palma aceitera y cítricos, los cuales son extensivos y con alto uso de plaguicidas (de la Cruz *et al*, 2014).
  - Recopilación de la información propia de Costa Rica con base en las variables de peso de cada modelo y los cultivos o escenarios clave que se requiere modificar o crear. Una vez identificadas las variables que se deben modificar, se recomienda

hacer una verificación de la información disponible en nuestro país y luego realizar proyectos que permitan generar la información faltante.

- Identificar y caracterizar los tipos de cuerpos de agua asociados a las zonas agrícolas del país, de manera que se obtenga un cuerpo de agua con las dimensiones y características estandarizadas para incorporar en los escenarios.
- Ampliar la comparación entre las concentraciones estimadas por los modelos y las concentraciones ambientales medidas para tomar en consideración los resultados de las sobreestimaciones muy altas así como las subestimaciones, con el fin de valorar qué escenarios disponibles en los modelos son aplicables en las condiciones en que están diseñados, cuáles requieren modificaciones en alguna variable de peso y qué nuevos escenarios sería indispensable crear.
- Desarrollar estudios que evalúen la degradación y movilidad de plaguicidas en ambientes tropicales, los cuales podrán servir de referencia para la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales.

Para el MINAE:

- Continuar con el uso del modelo FOCUS en sus niveles 1 y 2 en el proceso de registro de plaguicidas y en casos necesarios, hacer refinamiento con FOCUS 3 o PWC, siempre y cuando se cuente con todos los datos para el uso de estas herramientas.
- Ajustar el Procedimiento general y lineamientos a seguir por parte del MINAE para la evaluación de riesgo ambiental de plaguicidas sintéticos formulados con base en las investigaciones que se generen a partir de las recomendaciones de este documento.
- Ajustar el Plan Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos de Agua Superficiales de manera que incorpore como parámetro obligatorio, la medición de plaguicidas en zonas agrícolas, ya que este Plan actualmente mide la presencia de plaguicidas como un parámetro complementario (Dirección de Agua, 2013), lo que hace que los datos sean escasos.

## Bibliografía

- Arias-Andrés, M., Rämö, R., Mena, F., Ugalde, R., Grandas, L., Ruepert, C., . . . Van den Brink, P. (2018). Lower tier toxicity risk assessment of agricultura pesticides detected on the Río Madre de Dios watershed, Costa Rica. *Environmental Science and Pollution Research*. 25(14):13312-13321 doi:DOI 10.1007/s11356-016-7875-7
- Bach, M., & Hollis, J. (2012). Comment on “Regulatory FOCUS Surface Water Models Fail to Predict Insecticide Concentrations in the Field”. *Environmental Science & Technology*, 1177-1178.
- Boivin, A., & Poulsen, V. (2017). Environmental risk assessment of pesticides: state of the art and prospective improvement from science. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 6889–6894.
- Capel, P., Larson, S., & Winterstein, T. (2001). The behaviour of 39 pesticides in surface waters as a function of scale. *Hydrological Processes*, 15, 1251-1269. doi:DOI: 10.1002/hyp.212
- Carriquiriborde, 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.
- Castillo, L., Martínez, E., Ruepert, C., Savage, C., Gilek, M., Pinnock, M., & Solís, E. (2006). Water quality and macroinvertebrate community response following pesticide applications in a banana plantation, Limon, Costa Rica. *Science of the Total Environment*, 367, 418–432.
- Castillo, L., De la Cruz, E., & Ruepert, C. (1997). Ecotoxicology and pesticides in tropical aquatic ecosystems of Central America. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16 (1), 41–51.
- CGR. (2004). *INFORME No. FOE-AM-19/2004*. San José, Costa Rica: Contraloría General de la República.
- Comisión Europea. (2009). REGLAMENTO (CE) N o 1107/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 21 de octubre de 2009 relativo a la comercialización de productos fitosanitarios y por el que se derogan las Directivas 79/117/CEE y 91/414/CEE del Consejo. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 309, 50.
- Comisión Europea. (2011). *REGLAMENTO (UE) No 546/2011 DE LA COMISIÓN de 10 de junio de 2011 por el que se aplica el Reglamento (CE) no 1107/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo a los principios uniformes para la evaluación y autorización de los productos fitosan.*
- COSAR Huetar Caribe. (2015). Plan Regional de Desarrollo Agropecuario y Rural 2015-2018, Región Huetar Caribe. Recuperado de:

[http://www.infoagro.go.cr/InfoRegiones/Documents/PRDAR\\_2015-2018\\_HuetarCaribe.pdf](http://www.infoagro.go.cr/InfoRegiones/Documents/PRDAR_2015-2018_HuetarCaribe.pdf)

CSRA Central Oriental. (2015). Plan regional de desarrollo agropecuario y rural central oriental. Recuperado de:

[http://www.infoagro.go.cr/InfoRegiones/Documents/PRDAR\\_2015-2018\\_CentralOriental.pdf](http://www.infoagro.go.cr/InfoRegiones/Documents/PRDAR_2015-2018_CentralOriental.pdf)

CSRA Huetar Norte. (2015). Plan Regional de Desarrollo Agropecuario y Rural 2015-2018, Región Huetar Norte. Recuperado de:

[http://www.infoagro.go.cr/InfoRegiones/Documents/PRDAR\\_2015-2018\\_HuetarNorte.pdf](http://www.infoagro.go.cr/InfoRegiones/Documents/PRDAR_2015-2018_HuetarNorte.pdf)

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* número N° 7 del 10 de enero del 2007.

Decreto Ejecutivo N° 40059-MAG-MINAE-S. (2017). Reglamento Técnico: “RTCR 484:2016. Insumos Agrícolas. Plaguicidas Sintéticos Formulados, Ingrediente Activo Grado Técnico, Coadyuvantes y Sustancias Afines de Uso Agrícola. Registro, Uso y Control”. *Diario Oficial La Gaceta* número 9 del 12 de enero de 2017.

de la Cruz, E., Bravo-Durán, V., Ramírez, F., & Castillo, L. (2014). Environmental hazards associated with pesticide import into Costa Rica, 1977-2009. *Journal of Environmental Biology*, 35, 43-55.

Di Guardo, A., Gouin, T., MacLeod, M., & Scheringer, M. (2017). Environmental fate and exposure models: Advances and challenges 1 in 21st century chemical risk assessment. 20(1):58-71 *Environmental Science: Processes & Impacts*. doi:10.1039/C7EM00568G.

Diepens, N., Pfennig, S., Van de Brink, P., Gunnarsson, J., Ruedert, C., & Castillo, L. (2014). Effect of pesticides used in banana and pineapple plantations on aquatic ecosystems in Costa Rica. *Journal of Environmental Biology*, 35, 73-84.

DIGECA. (2011). *Procedimiento general y lineamientos para la Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA) para Registro de Plaguicidas*. Recuperado de [http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/era\\_version\\_anterior\\_nov\\_2017.pdf](http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/era_version_anterior_nov_2017.pdf)

Dirección de Agua. (2013). *Plan Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos de Agua Superficiales*. San José.

Dirección de Agua. (2018). *Base de datos de Fase 2 del Plan Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos de Agua Superficiales*. Dirección de Agua, Ministerio de Ambiente y Energía.

- Echeverría-Sáenz, S.; Mena, F.; Arias-Andrés, M.; Vargas, S.; Ruepert, C.; Van den Brink, P.J.; Castillo, L.E. y Gunnarsson, J.S. (2018). In situ toxicity and ecological risk assessment of agro-pesticide runoff in the Madre de Dios River in Costa Rica. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(14), 13270–13282. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-016-7817-4>
- Echeverría-Sáenz, S., Mena, F., Pinnock, M., Ruepert, C., Solano, K., de la Cruz, E., . . . 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.
- EFSA. (2013). Guidance on tiered risk assessment for plant protection products for aquatic organisms in edge-of-field surface waters. *EFSA Journal*, 11(7), 3290.
- EPA. (1992). *Framework for ecological risk assessment*. Environmental Protection Agency. Washington: U.S.
- EPA. (2017). *Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act (FIFRA) and Federal Facilities*. Recuperado de <https://www.epa.gov/enforcement/federal-insecticide-fungicide-and-rodenticide-act-fifra-and-federal-facilities>
- EPA. (s.f.). *Technical Overview of Ecological Risk Assessment*. Recuperado de <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/ecological-risk-assessment-pesticides-technical>
- FAO. (2019). FAOSTAT Pesticides Use. Recuperado de: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RP/visualize>
- FAO/OMS. (2010). *Código internacional de conducta sobre la distribución y utilización de plaguicidas-Directrices para el registro de plaguicidas*. Roma: FAO.
- FAO/OMS. (2017). *Manual sobre la elaboración y uso de las especificaciones de plaguicidas de la FAO y la OMS*. Roma: Tercera Edición, Organización Mundial de la Salud y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FOCUS. (2015). *Generic guidance for FOCUS surface water scenarios*. Recuperado de [https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public\\_path/projects\\_data/focus/sw/docs/Generic%20FOCUS\\_SWS\\_vc1.4.pdf](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/projects_data/focus/sw/docs/Generic%20FOCUS_SWS_vc1.4.pdf)
- Fournier, M.L.; Echeverría-Sáenz, S.; Mena, F.; Arias-Andrés, M.; de la Cruz, E. y Ruepert, C. (2018). Risk assessment of agriculture impact on the Frío River watershed and Caño Negro Ramsar wetland, Costa Rica. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(14), 13347-13359. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-016-8353-y>
- Fournier, M., Ramírez, F., Ruepert, C., Vargas, S., & Echeverría-Sáenz, S. (2010). *Diagnóstico sobre contaminación de aguas, suelos y productos hortícolas por el*



*uso de agroquímicos en la microcuenca de las quebradas Plantón y Pacayas en Cartago, Costa Rica. Informe final.* Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) e Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET), Universidad Nacional.

- Grant, P., Woudneh, M., & Ross, P. (2013). Pesticides in blood from spectacled caiman (*Caiman crocodilus*) downstream of banana plantations in Costa Rica. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 32(11), 2578-2583.
- Holvoet, K., Seuntjens, P., & Vanrolleghem, P. (2007). Monitoring and modeling pesticide fate in surface waters at the catchment scale. *Ecological Modelling*, 209, 53-64.
- Huff Hartz, K., Edwards, T., & Lydy, M. (2017). Fate and transport of furrow-applied granular tefluthrin and seedcoated clothianidin insecticides: Comparison of field-scale observations and model estimates. *Ecotoxicology*, 26(7), 876-888
- Knäbel, A., Meyer, K., Rapp, J., & Schulz, R. (2014). Fungicide Field Concentrations Exceed FOCUS Surface Water Predictions: Urgent Need of Model Improvement. *Environmental Science & Technology*, 48, 455-463.
- Knäbel, A., Scheringer, M., Stehle, S., & Schulz, R. (2016). Aquatic Exposure Predictions of Insecticide Field Concentrations Using a Multimedia Mass-Balance Model. *Environmental Science & Technology*, 50, 7, 3721-3728. doi: 10.1021/acs.est.5b05721
- Knauer, K. (2016). Pesticides in surface waters: a comparison with regulatory acceptable concentrations (RACs) determined in the authorization process and consideration for regulation. *Environmental Sciences Europe*, 28, 13.
- Leonard, R. (1990). Movement of Pesticides into Surface Waters. En Soil Science Society of America, *Pesticides in the Soil Environment* (serie 2, 303-349). Madison: SSSA.
- Lewis. (2016). Pesticide Behavior, Fate, and Effects in the Tropics: An Overview of the Current State of Knowledge. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. doi:DOI: 10.1021/acs.jafc.6b01320
- Mena, F., San Juan, M., Campos, B., Sánchez-Ávila, J., Faria, M., Pinnock, M., . . . Barata, C. (2014). Pesticide residue analyses and biomarker responses of native Costa Rican fish of the Poeciliidae and Cichlidae families to assess environmental impacts of pesticides in Palo Verde National Park. *Journal of Environmental Biology*, 35(1), 19.
- PPDB. (2018). Pesticide Properties DataBase. University of Hertfordshire. Recuperado de: <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/>.
- Polidoro, B., & Morra, M. (2016). An ecological risk assessment of pesticides and fish kills in the Sixaola watershed, Costa Rica. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 5983-5991.

- Racke, K., Skidmore, M., Hamilton, D., Unsworth, J., Miyamoto, J., & Cohen, S. (1997). Pesticide fate in tropical soils. *Pure & Applied Chemistry*, 69(6), 1349-1371.
- Rämö, RA; van den Brink, PJ; Ruepert, C; Castillo, LE; Gunnarsson, JS. (2018). Toxicity Risk Assessment of Pesticides from Banana Plantations in the River Madre de Dios, Costa Rica using PERPEST, SSD and msPAF models. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(14):13254-13269.
- Rumschlag, S., Bessler, S., & Rohr, J. (2019). Evaluating improvements to exposure estimates from fate and transport models by incorporating environmental sampling effort and contaminant use. *Water Research*, 156, 372-382.
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Santos Pereira, A., Daam, M., & Cerejeira, M. (2017). Evaluation of FOCUS surface water pesticide concentration predictions and risk assessment of field-measured pesticide mixtures—a crop-based approach under Mediterranean conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 17394–17406.
- Schäfer, R., van den Brink, P., & Liess, M. (2011). Impacts of Pesticides on Freshwater Ecosystems. *Ecological Impacts of Toxic Chemicals*, 111-137.
- Secretaría General de la Comunidad Andina. (2002). *Resolución 630 Manual Técnico Andino para el Registro y Control de Plaguicidas Químicos de Uso Agrícola*. Recuperado de: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/manual-tecnico-andino-registro-control-plaguicidas-quimicos-uso-agricola>
- SETAC. (2010). *Linking aquatic exposure and effects, Risk assessment of pesticides*. Florida: CRC Press.
- SFE. (2018). Sistema de Insumos y Fiscalización. Servicio Fitosanitario del Estado. Recuperado de: <http://app.sfe.go.cr/SFEInsumos/asp/Seguridad/Home.aspx>.
- Stehle, S. & Schulz, R. (2015). Agricultural insecticides threaten surface waters at the global scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (18) 5750-5755; DOI:10.1073/pnas.1500232112
- Teklu, B., Adriaanse, P., Ter Horst, M., Deneer, J., & Van den Brink, P. (2015). Surface water risk assessment of pesticides in Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 508, 566–574.
- Tsuzuki, M., Inoue, A., Takimoto, Y., & Nishihara, T. (2003). Using simulation models to assess the ecological risk of pesticides to aquatic organisms. *Journal of Health Science*, 49(4), 249-259.
- UEAA. (2017). *Procedimiento general y lineamientos a seguir por parte del MINAE para la evaluación de riesgo ambiental de plaguicidas sintéticos formulados*.

Recuperado de

[http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/procedimiento\\_para\\_era\\_0.pdf](http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/procedimiento_para_era_0.pdf)

- Van den Berg, F., Beltman, W., Adriaanse, P., de Jong, A., & te Roller, J. (2015). *SWASH Manual 5.3*. Wageningen: Statutory Research Tasks Unit for Nature & the Environment.
- Vargas, S. & Saravia, A. (2013). *Estudio del efecto de la escorrentía, en la variación de las concentraciones de residuos de plaguicidas, presentes en las aguas superficiales del río Caño Azul, Limón, Costa Rica* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional, Costa Rica.
- Walker, C., Hopkin, S., & Sibly, R. (2001). *Principles of Toxicology*. New York: Taylor & Francis Inc.
- Xie, Y. (2016). *Report 293 – Part I: Developing a California-Based Receiving Waterbody Model for Pesticide Product Registration Evaluation: Review of Model Theory*. Department of Pesticide Regulation, Sacramento, California.
- Xie, Y., Luo, Y., Singhasemanon, N., & Goh, K. (2018). Regulatory Modeling of Pesticide Aquatic Exposures in California's Agricultural Receiving Waters. *Journal of Environmental Quality*, 47(6):1453-1461.
- Young, D. (2016). *The Variable Volume Water Model Revision A*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Pesticide Programs, Washington, D.C.
- Young, D. (2016a). *Pesticide in Water Calculator User Manual for Versions 1.50 and 1.52*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Young, D. (2019). U.S. Environmental Protection Agency Model for Estimating Pesticides in Surface Water. In: K. Goh, J. Gan, D. Young and Y. Luo, ed., *Pesticides in Surface Water: Monitoring, Modeling, Risk Assessment, and Management*. American Chemical Society.

## **Anexos**

**Anexo 1.** Base de datos de concentraciones ambientales de plaguicidas detectados en cuerpos de agua de Costa Rica en el periodo entre 2006 y 2017.

En el archivo digital adjunto se encuentra un documento electrónico en formato Microsoft Excel, donde se puede realizar la consulta de las concentraciones ambientales máximas y las propiedades físicas y químicas de cada plaguicida utilizado en este estudio.

Además, contiene la lista de todos los datos reportados en las investigaciones de referencia y las citas bibliográficas de dónde se obtuvo cada dato.

**Anexo 2.** Valores de entrada que requieren los modelos FOCUS y PWC.

Valores de entrada	FOCUS 1	FOCUS 2	FOCUS 3	PWC
<b>Uso agronómico</b>				
Tasa de aplicación	X	X	X	X
Número de aplicaciones	Xb	Xb	Xb	Xa
Tipo de cultivo	X	X	X	X
Intervalo entre aplicaciones		X	X	X
Intercepción del cultivo		X	X	
Región y estación de la aplicación		X		
Fecha de aplicación			X	X
Método de aplicación			X	X
Eficiencia de la aplicación				X
Fracción de deriva				X
<b>Propiedades del plaguicida</b>				
Solubilidad en agua	X	X	X	X
coeficiente de carbono orgánico (Koc o Kd)	X	X	X	X
Vida media (DT50) en agua/sedimento	X	X		
Vida media (DT50) en agua		X	X	X
Vida media (DT50) en sedimento		X	X	X
Vida media (DT50) en suelo		X	X	X
Vida media (DT50) por fotólisis acuosa y la latitud de referencia				X
Vida media (DT50) por hidrólisis				X
Vida media (DT50) en follaje				X
Presión de vapor			X	X
Masa molecular				X
Constante de Henry				X
Coefficiente de difusión en aire				X
Entalpía de evaporación			X	X
Entalpía de disolución			X	
Exponente Freundlich			X	
Concentración de referencia en fase líquida			X	
Energía de activación molar en agua y en			X	

<b>Valores de entrada</b>	<b>FOCUS 1</b>	<b>FOCUS 2</b>	<b>FOCUS 3</b>	<b>PWC</b>
sedimento				
Factores de conversión molar			X	
Propiedades fisicoquímicas y destino ambiental de metabolitos			X	
Coefficiente de referencia de difusión en agua			X	

<sup>a</sup>Número de aplicaciones por año.

<sup>b</sup>Número de aplicaciones por estación.

**Anexo 3.** Propiedades físicas y químicas de los 53 plaguicidas medidos en cuerpos de agua de Costa Rica (estudios del IRET 2006-2017) y en el Plan Nacional de Monitoreo de los cuerpos de agua superficiales.

Acción biocida	COD	Plaguicida	MM (g/mol)	Sol_A (mg/l)	DT <sub>50_H</sub> (días)	DT <sub>50_F</sub> (días)	DT <sub>50_Ase</sub> (días)	DT <sub>50_A</sub> (días)	DT <sub>50</sub>		Koc/Kfoc (ml/g)	P_vapor (Pa)	C_Henry (Pa*m3/mol)
									Foliar (días)	Su (días)			
fungicida	P03	azoxistrobina	403,4	6,7	estable	8,7	205	6,1	84,5	8,4	589	1,10E-10	7,40E-09
	P04	bitertanol	337,42	3,8	estable	18	39,2	27	8,5	9,7	2461	1,36E-09	2,60E-07
	P48	boscalid	343,21	4,6	estable	30	-	-	246	6,9	772	7,20E-07	5,18E-05
	P08	carbendazina	191,21	8	350	estable	33,7	7,9	34,3	8,4	225	9,00E-05	3,60E-03
	P10	ciprodinil	225,29	13	estable	13,5	142	12,5	53	8,1	2277	5,10E-04	6,60E-03
	P12	clorotalonil	265,91	0,81	29,6	0,72	0,57	0,82	3,53	5,5	2632	7,60E-05	2,50E-02
	P15	difenoconazol	406,26	15	estable	estable	1053	3	130	8,6	3760	3,33E-08	9,00E-07
	P17	epoxiconazol	329,76	7,1	estable	52	119,8	65,8	226	11,8	1073	1,00E-05	4,71E-04
	P20	fenpropimorf	303,48	4,32	estable	estable	38	2,65	19,6	2,2	4382	3,90E-03	2,74E-04
	P51	fluopiram	396,76	16	estable	21	1077	20,5	309	6,5	278,9	1,20E-06	2,98E-05
	P21	flutolanil	323,31	8,01	estable	277	320	90,5	231	29,3	735	4,10E-07	1,65E-05
	P23	hexaclorobenceno	284,8	0,0047	-	-	-	-	2000	9,7	50000	1,45E-03	1,03E+01
	P25	imazalil	297,18	184	estable	6,1	117	7,8	76,3	55,2	4753	1,58E-04	1,08E-04

Acción biocida	COD	Plaguicida	MM (g/mol)	Sol_A (mg/l)	DT <sub>50_H</sub> (días)	DT <sub>50_F</sub> (días)	DT <sub>50_Ase</sub> (días)	DT <sub>50_A</sub> (días)	DT <sub>50_Su</sub> (días)	DT <sub>50</sub>			
										Foliar (días)	Koc/Kfoc (ml/g)	P_vapor (Pa)	C_Henry (Pa*m3/mol)
	P27	metalaxil	279,33	8400	106	estable	56	56	36	9,2	162	7,50E-04	1,60E-05
	P28	miclobutanil	288,78	132	estable	15	626	12	365	4,1	517	1,98E-04	4,33E-04
	P31	penicuron	328,84	0,3	156	estable	113,5	5,3	82,4	2,2	4906	4,10E-07	5,10E-04
	P33	piraclostrobin	387,8	1,9	estable	1,7	28	2	62	4,7	9304	2,60E-08	5,31E-06
	P34	pirimetanil	199,11	121	estable	estable	80	16,5	55	15,1	301	1,10E-03	3,60E-03
	P36	procloraz	376,7	26,5	estable	1,5	359	2	223,6	5,6	500	1,50E-04	1,64E-03
	P37	propiconazol	342,22	150	53,5	estable	561	6	71,8	7,4	1086	5,60E-05	9,20E-05
	P38	quintozeno	295,3	0,44	estable	-	-	-	210	11,5	4498	1,27E-02	3,70E+01
	P53	spiroxamina	297,5	405	estable	50,5	66,2	0,8	35	14,1	14567	3,50E-03	3,80E-03
	P39	tebuconazol	307,82	36	estable	estable	365	42,6	365	13,6	769	1,30E-06	1,00E-05
	P40	tecnaceno	260,89	1,3	estable	-	94	-	11	-	12662	2,70E-02	3,70E-05
	P43	tiabendazol	201,25	30	203	1,2	4	1,6	1000	-	3983	5,30E-07	3,70E-06
	P44	tolclofos-metil	301,13	0,708	97	38,3	15	1,25	7,6	6,7	3028	8,77E-04	3,70E-01
	P45	triadimefon	293,8	70	estable	0,8	43	12	26	4,3	300	2,00E-05	9,00E-05
	P46	triadimenol	295,76	72	estable	9	91	53	136,7	11,7	750	5,00E-07	3,50E-06
herbicida	P01	alaclor	269,77	240	0,5	0,5	2	-	35	-	335	2,90E-03	3,20E-03



Acción biocida	COD	Plaguicida	MM (g/mol)	Sol_A (mg/l)	DT <sub>50_H</sub> (días)	DT <sub>50_F</sub> (días)	DT <sub>50_Ase</sub> (días)	DT <sub>50_A</sub> (días)	DT <sub>50_Su</sub> (días)	DT <sub>50</sub>			
										Foliar (días)	Koc/Kfoc (ml/g)	P_vapor (Pa)	C_Henry (Pa*m3/mol)
	P02	ametrina	227,12	200	estable	-	-	-	60	-	316	3,65E-04	4,10E-04
	P47	atrazina	215,68	35	86	2,6	80	-	75	-	100	3,90E-05	1,50E-04
	P05	bromacil	261,12	815	estable	estable	-	-	60	-	32	4,10E-05	1,50E-05
	P06	butacloro	311,9	20	-	-	-	-	56	-	700	2,40E-04	3,74E-03
	P16	diuron	233,09	35,6	estable	43	48	8,8	75,5	-	813	1,15E-06	2,00E-06
	P24	hexazinona	252,31	33000	56	56	-	-	90	11,3	54	3,00E-05	1,10E-07
	P26	linuron	249,09	63,8	1460	estable	24,1	13	57,6	-	842,8	5,10E-05	2,00E-04
	P29	oxifluorfen	361,7	0,116	estable	5,6	-	-	138	3,6	7566	2,60E-05	0,02382
	P42	terbutrina	241,36	25	estable	0,5	60	27	74	-	2432	1,30E-04	1,50E-03
insecticida	P49	buprofezin	305,44	0,46	estable	33	49	16,8	135,4	7,4	5363	4,20E-05	2,80E-02
	P07	carbaril	201,22	9,1	12	10	5,8	3,1	16	6	300	4,16E-05	9,20E-05
	P11	clorfenvinfos	359,6	145	125	-	-	7	37	20,2	680	5,30E-04	-
	P13	clorpirifos	350,58	1,05	53,5	29,6	36,5	5	386	7,2	5509	1,43E-03	4,78E-01
	P14	diazinon	304,35	60	138	50	10,4	4,3	9,1	3,5	609	1,20E-02	6,09E-02
	P50	dimetoato	229,26	25900	68	175	15,5	12,6	2,5	4,6	28,3	2,47E-05	1,42E+06
	P22	Forato	260,4	50	3,2	1,1	-	-	40	7,7	1660	1,12E-01	5,90E-01

Acción biocida	COD Plaguicida	MM (g/mol)	Sol_A (mg/l)	DT <sub>50_H</sub> (días)	DT <sub>50_F</sub> (días)	DT <sub>50_Ase</sub> (días)	DT <sub>50_A</sub> (días)	DT <sub>50_Su</sub> (días)	DT <sub>50</sub>			
									Foliar (días)	Koc/Kfoc (ml/g)	P_vapor (Pa)	C_Henry (Pa*m3/mol)
	P52 oxamil	219,26	148100	8	7,4	0,7	-	6,6	8,9	16,6	5,10E-05	4,89E-08
	P30 paration metil	263,21	55	21	9	5	15	12	3,6	240	2,00E-04	8,57E-03
	P32 permetrina	391,3	0,2	31	1	40	23	13	11,1	100000	7,00E-06	1,89E-01
	P35 pirimifos-metil	305,33	11	117	0,2	-	-	12	2,9	1100	2,00E-06	6,08E-05
nematicida	P09 carbofuran	221,26	322	37	71	9,7	6,1	12,8	6,8	86,5	8,00E-05	5,00E-05
	P18 etoprofos	242,3	1300	estable	estable	83	20	13,6	-	70	7,80E-02	1,35E-02
	P19 fenamifos	303,36	345	304	0,2	60,2	5,8	0,9	6,5	446,2	6,70E-05	2,80E-05
	P41 terbufos	288,4	4,5	6,5	4,5	-	-	5	-	500	3,46E-02	2,70E+00

Datos: masa molar (MM), solubilidad en agua (Sol\_A), vida media por hidrólisis en agua (DT<sub>50\_H</sub>), vida media por fotólisis en agua (DT<sub>50\_F</sub>), vida media en sistemas acuáticos (DT<sub>50\_Ase</sub>), vida media en agua (DT<sub>50\_A</sub>), vida media en sedimentos (DT<sub>50\_Se</sub>), vida media en suelo (DT<sub>50\_Su</sub>), vida media foliar (DT<sub>50\_Foliar</sub>), coeficiente de partición del carbono orgánico (Koc/Kfoc), presión de vapor (P\_vapor), constante de Henry (C\_Henry).

**Anexo 4.** Escenarios, cultivos y condiciones agronómicas seleccionadas en los modelos FOCUS y PWC.

Plaguicida	Cultivo	FOCUS 1-2		FOCUS 3			PWC		
		Intercepción	Tipo de cultivo	Tipo de cultivo	Cuerpo de agua (Escenario)	MAp	Tipo de cultivo	Escenario	MAp
clorpirifos	Arroz	No	sin deriva	cereales	pond (R1), stream (R1, R4)	GR	sorgo, trigo	KSorghumSTD, NDwheatSTD	ADC
	Cebolla	No	sin deriva	verduras de bulbo	pond (R1), stream (R1, R2, R3, R4)	GR	cebolla	CAonion_WirrigSTD, GAOnion_WirrigSTD	ADC
	Chile dulce	No	sin deriva	verduras de fruta	stream (R2, R3, R4)	GR	chile	FLpeppersSTD	ADC
	Maíz	No	sin deriva	Maíz	pond (R1), stream (R1, R2, R3, R4)	GR	Maíz	Iacornstd, ILCornSTD, INCornStd, KSCornStd, MNCornStd, MSCornSTD, NCcornESTD, NECornStd, OHCornSTD, PAcornSTD	ADC
	Papa	No	sin deriva	Papa	pond (R1), stream (R1, R2, R3)	GR	papa	MEpotatoSTD, IDNpotato_WirrigSTD	ADC
	Piña	Sí	<50 cm	Papa	pond (R1), stream (R1, R2, R3)	AS	papa	IDNpotato_WirrigSTD, MEpotatoSTD	AEC
	Tomate	No	sin deriva	verduras de fruta	stream (R2, R3, R4)	GR	tomate	FLtomatoSTD_V2	ADC
diuron	banano	No	<50 cm	ND	ND	AS	cítricos	CACitrus_WirrigSTD, FLCitrusSTD	ADC

Plaguicida	Cultivo	FOCUS 1-2		FOCUS 3			PWC		
		Intercepción	Tipo de cultivo	Tipo de cultivo	Cuerpo de agua (Escenario)	MAp	Tipo de cultivo	Escenario	MAp
	Caña de azúcar	No	<50 cm	maíz	pond (R1), stream (R1, R2, R3, R4)	AS	caña de azúcar	LA sugarcaneSTD	ADC
	cítricos	No	<50 cm	ND	ND	AS	cítricos	CACitrus_WirrigSTD, FLcitrusSTD	ADC
	Maíz	No	<50 cm	maíz	pond (R1), stream (R1, R2, R3, R4)	AS	Maíz	Iacornstd, ILCornSTD, INCornStd, KSCornStd, MNCornStd, MScornSTD, NCcornESTD, NECornStd, OHCornSTD, PAcornSTD	ADC
	Piña	No	<50 cm	papa	pond (R1), stream (R1, R2, R3)	AS	papa	MEpotatoSTD, IDNpotato_WirrigSTD	ADC
	Yuca	No	<50 cm	papa	pond (R1), stream (R1, R2, R3)	AS	papa	MEpotatoSTD, IDNpotato_WirrigSTD	ADC
etoprofos	Banano	No	sin deriva	pomo	pond (R1), stream (R1, R2, R3, R4)	GR	cítricos	CACitrus_WirrigSTD, FLcitrusSTD	ADC
	Caña de azúcar	No	sin deriva	maíz	pond (R1), stream (R1, R2, R3, R4)	GR	caña de azúcar	LA sugarcaneSTD	ADC
	Chile dulce	No	sin deriva	verduras de fruta	stream (R2, R3, R4)	GR	chile	FLpeppersSTD	ADC
	Frijol	No	sin deriva	frijol de campo	pond (R1), stream (R1, R2, R3, R4)	GR	frijol	ORsnbeansSTD, MIbeansSTD	ADC

Plaguicida	Cultivo	FOCUS 1-2		FOCUS 3			PWC		
		Intercepción	Tipo de cultivo	Tipo de cultivo	Cuerpo de agua (Escenario)	MAp	Tipo de cultivo	Escenario	MAp
	Maíz	No	sin deriva	maíz	pond (R1), stream (R1, R2, R3, R4)	GR	Maíz	Iacornstd, ILCornSTD, INCornStd, KSCornStd, MNCornStd, MScornSTD, NCcornESTD, NECornStd, OHCornSTD, PAcornSTD	ADC
	Piña	Sí	<50 cm	papa	pond (R1), stream (R1, R2, R3)	AS	papa	MEpotatoSTD, IDNpotato_WirrigSTD	AEC
	Sandía	No	sin deriva	verduras de fruta	stream (R2, R3, R4)	GR	melón	MImelonStd	ADC
metalaxil	Chile dulce	Sí	<50 cm	verduras de fruta	stream (R2, R3, R4)	AS	chile	FLpeppersSTD	AEC
	Papa	Sí	<50 cm	papa	pond (R1), stream (R1, R2, R3)	AS	papa	MEpotatoSTD IDNpotato_WirrigSTD	AEC
	Piña	Sí	<50 cm	papa	pond (R1), stream (R1, R2, R3)	AS	papa	IDNpotato_WirrigSTD MEpotatoSTD	AEC
	Sandía	Sí	<50 cm	verduras de fruta	stream (R2, R3, R4)	AS	melón	MImelonStd	AEC
	Tomate	Sí	<50 cm	verduras de fruta	stream (R2, R3, R4)	AS	tomate	FLtomatoSTD_V2	AEC

Datos: MAp: Momento y forma de aplicación; <50cm: aplicación manual por debajo de 50 cm; GR: granulado; AS: aspersión al suelo; AEC: aplicación por encima del cultivo; ADC: aplicación por debajo del cultivo.

## Anexo 5. Ejemplo de los reportes generados por los modelos FOCUS para clorpirifos

### STEPS 1-2 in FOCUS

#### FOCUS Surface water Tool for Exposure Predictions Step 1

developed by Michael Klein

Program version: Version 1.1  
Date of this simulation: 29/8/2019, 20:23:12

#### OVERVIEW ON THE SUBSTANCE SPECIFIC INPUT DATA USED IN THE CALCULATION

Comments: Arroz

Active substance:	Clorpirifos
Application rate (g/ha) of a.i.:	750.00
Application/crop type:	no drift (incorp or seed trtmt)
Number of applications per season:	1.00
Water solubility (mg/L):	1.00
KOC (L/kg):	5509.00
DT50 water/sediment (d):	36.00

#### SCENARIO DATA USED IN THE CALCULATION

Distance to the water body (m):	1.00
Spraydrift (% of application):	0.0000
Runoff + drainage(% of application):	10.00
Ratio of field to water body:	10.00
Water depth (cm):	30.00
Sediment depth (cm):	5.00
Effective sediment depth for sorption (cm):	1.00
Sediment OC (%):	5.00
Sed. bulk density (kg/L):	0.80

#### RESULTS OF THE CALCULATION

Equivalent application rate for drift (g/ha):	750.00
Equivalent application rate for runoff/drainage(g/ha):	750.00
Loading to water body via drift (mg/m <sup>2</sup> ):	0.0000
Loading to water body via runoff/drainage(mg/m <sup>2</sup> ):	75.0000
fraction of substance entering water body in water phase:	0.1198
fraction of substance entering water body in sediment phase:	0.8802

Table: Calculated Concentrations in the water body

Time (d)	PEC <sub>sw</sub> (µg/L)		PEC <sub>sed</sub> (µg/kg dry sediment)	
	Actual	TWA	Actual	TWA
0	29.9569		1.65E+03	
1	29.3856	29.6712	1.62E+03	1.63E+03
2	28.8252	29.3879	1.59E+03	1.62E+03
4	27.7363	28.8326	1.53E+03	1.59E+03
7	26.1796	28.0259	1.44E+03	1.54E+03
14	22.8786	26.2590	1.26E+03	1.45E+03
21	19.9938	24.6406	1.1E+03	1.36E+03
28	17.4728	23.1567	962.5752	1.28E+03
42	13.3443	20.5431	735.1356	1.13E+03
50	11.4393	19.2350	630.1905	1.06E+03
100	4.3682	13.2900	240.6438	732.1462

Maximum PEC<sub>sw</sub> values in water and sediment are calculated from single application.

Compare with ecotox endpoints. If TER values are less than regulatory triggers, then go to Step 2

## STEPS 1-2 in FOCUS

### FOCUS Surface water Tool for Exposure Predictions Step 2

*developed by Michael Klein*

Program version: Version 1.1  
Date of this simulation: 29/8/2019, 20:24:09

#### OVERVIEW ON THE SUBSTANCE SPECIFIC INPUT DATA USED IN THE CALCULATION

*Comments: Arroz*

Active substance:	Clorpirifos
Application rate (g/ha) of a.i.:	750.00
Crop Interzeption:	no interception (0 %)
Application/crop type:	no drift (incorp or seed trtmt)
Number of applications per season:	1
Region and season of application:	South Europe, Mar. - May
Water solubility (mg/L):	1.00
KOC (L/kg):	5509.00
DT50 water(d):	5.00
DT50 sediment (d):	36.00
DT50 soil (d):	386.00

#### SCENARIO DATA USED IN THE CALCULATION

Distance to the water body (m):	1.00
Spraydrift (% of application):	0.0000
Runoff + drainage(% of application):	4.00
Ratio of field to water body:	10.00
Water depth (cm):	30.00
Sediment depth (cm):	5.00
Effective sediment depth for sorption (cm):	1.00
Sediment OC (%):	5.00
Sed. bulk density (kg/L):	0.80

#### RESULTS OF THE CALCULATION

Number of application per season considered for this run:	1
Equivalent application rate for drift (g/ha):	750.00
Equivalent application rate for runoff/drainage(g/ha):	750.00
Loading to water body per drift event(mg/m <sup>2</sup> ):	0.0000
Loading to water body via runoff/drainage(mg/m <sup>2</sup> ):	29.7853
fraction of substance entering water body in water phase:	0.1198
fraction of substance entering water body in sediment phase:	0.8802
Total Loading to water body via drift (mg/m <sup>2</sup> ):	0.0000 ( 0.0000%)
Total Loading to water body via water phase(mg/m <sup>2</sup> ):	3.5691 ( 11.9827%)
Total Loading to water body via sediment phase (mg/m <sup>2</sup> ):	26.2162 ( 88.0173%)
Maximum PECsw (µg/L):	11.8970
Maximum PECsw occuring on day:	4
Maximum PECsed (µg/kg dry sediment):	655.4048
Maximum PECsed occuring on day:	4

Table: Calculated Concentrations in the water body

Time after max. peak(d)	PECsw (µg/L)		PECsed(µg/kg dry sediment)		TWA
	PECsw	Actual	TWA	Actual	
0	11.8970	---	655.4048	---	
1	10.3569	11.1270	642.9063	649.1555	
2	10.0224	10.6583	622.1427	640.8400	

## Summary report: Cereals, spring\_R4\_Stream

TOXSWA GUI version : FOCUS TOXSWA 4.4.3 [3.1.0]  
 SPIN version : SPIN (Substances Plug IN) 2.2  
 Report generated on : 31-08-2019 15:26:38

```

* -----
* TOXSWA REPORT: Header
* Results from the TOXSWA model (c) Alterra
* FOCUS TOXSWA version : 4
* TOXSWA model version : 3.3.4
* TOXSWA created on : 02-Apr-2015
*
* Working directory : C:\SwashProjects\Tesis_P13_arroz\TOXSWA
* Run ID : 378
* Input file generated on : 31-08-2019
* -----
*
* Scenario : R4_Stream
* Meteo Station : Roujan
* Substance : P13
* Flow Type : Variable
* Water Body Type : R4_STREAM
* Application Scheme : FOCUS_EXAMPLE
* Simulation Period : 01-Mar-1984 to 28-Feb-1985
* -----
*
* End of TOXSWA REPORT: Header
* -----
*
* TOXSWA REPORT: Substance properties and substance loadings
*
* Summary for the following substances
*
* Substance 1: P13
* Molar mass (g.mol-1) : 350.6
* Saturated vapour pressure (Pa) : 0.143E+01 measured at (C) : 20.0
* Water solubility (mg.L-1) : 0.105E+01 measured at (C) : 20.0
* Half-life in water (d) : 5.00 measured at (C) : 20.0
* Half-life in sediment (d) : 36.50 measured at (C) : 20.0
* Kom susp.solids (coef. for sorption on organic matter) (L.kg-1) : 3195.48
* Freundlich exponent (-) : 0.90
* Kom sediment (coef. for sorption on organic matter) (L.kg-1) : 3195.48
* Freundlich exponent (-) : 0.90
* Kmp (coef. for sorption on macrophytes-dry weight) (L.kg-1) : 0.00
*
* Summary for the substance loadings
*
* Application pattern and deposition by drift on water surface
* Appl.No Date/Hour Mass (g ai.ha-1) Areic mean deposition (mg.m-2)
* 1 05-Mar-1984-09h00 1000.0000 0.0000
*
* Lateral entries: runoff and erosion Simulated by: PRZM
*
* Maximum hourly fluxes from lateral entries
* Year Type Water/Substance Flux Date
* 1984 Water 1.721 mm.m-2.hr-1 01-Dec-1984-00h00
* 1984 Runoff P13 0.000652 mg.m-2.hr-1 19-May-1984-01h00
* 1984 Runoff P13 172752.8 ug.L-1 30-Nov-1984-21h00
* 1984 Erosion P13 0.000002 mg.m-2.hr-1 23-Aug-1984-01h00
* 1985 Water 0.3136 mm.m-2.hr-1 17-Feb-1985-00h00
* 1985 Runoff P13 0.000028 mg.m-2.hr-1 17-Feb-1985-01h00
* 1985 Runoff P13 149824.2 ug.L-1 17-Feb-1985-07h00
* 1985 Erosion P13 < 1e-6 mg.m-2.hr-1 17-Feb-1985-01h00
*
* End of TOXSWA REPORT: Substance properties and substance loadings
* -----
*
* TOXSWA REPORT: Exposure in Waterbody

```



\* Table: Annual maximum exposure concentrations in water layer of substance: P13  
 \* In segment from 95.00 to 100.00 m in water body

* Year	Concentration µg.L-1	Date	Daynr
1984	0.2298	18-May-1984-13h00	79
1985	0.01779	17-Feb-1985-07h00	354

\* Tables: Maximum exposure concentrations in water layer  
 \* In segment from 95.00 to 100.00 m in water body  
 \* Actual concentrations PECsw as well as PECsed refer to momentary concentrations  
 \* occurring 1, 2 etc days after the global maximum concentration.  
 \* The Time Weighted Average Exposure Concentrations (TWaec) have been calculated  
 \* for a moving time frame and have been allocated to the last day of the period considered

\* Table: PEC in water layer of substance: P13

* Concentration µg.L-1	Date	Daynr
Global max	18-May-1984-13h00	79
(incl. suspend.solids	18-May-1984-13h00	79)
PECsw_1_day	19-May-1984-13h00	80
PECsw_2_days	20-May-1984-13h00	81
PECsw_4_days	22-May-1984-13h00	83
PECsw_7_days	25-May-1984-13h00	86
PECsw_14_days	01-Jun-1984-13h00	93
PECsw_21_days	08-Jun-1984-13h00	100
PECsw_28_days	15-Jun-1984-13h00	107
PECsw_42_days	29-Jun-1984-13h00	121
PECsw_50_days	07-Jul-1984-13h00	129
PECsw_100_days	26-Aug-1984-13h00	179

\* Legend: - in table means PECsw is later than end of simulated period: 28-Feb-1985

\* Table: Maximum Time Weighted Averaged Exposure Concentrations substance: P13

* Concentration µg.L-1	Date	Daynr
TWaecsw_1_day	20-May-1984-00h00	81
TWaecsw_2_days	20-May-1984-01h00	81
TWaecsw_4_days	22-May-1984-00h00	83
TWaecsw_7_days	22-May-1984-00h00	83
TWaecsw_14_days	29-May-1984-00h00	90
TWaecsw_21_days	05-Jun-1984-00h00	97
TWaecsw_28_days	12-Jun-1984-00h00	104
TWaecsw_42_days	26-Jun-1984-00h00	118
TWaecsw_50_days	04-Jul-1984-00h00	126
TWaecsw_100_days	09-Jun-1984-00h00	101

\* Tables: Maximum exposure content in sediment

\* In the top 5.00 cm sediment located under  
 \* the water body segment from 95.00 to 100.00m,  
 \* the content is expressed as µg substance per kg dry sediment.

\* Table: PEC in sediment of substance: P13

* Content µg.kg-1	Date	Daynr
Global max	25-May-1984-14h00	86
PECsed_1_day	26-May-1984-14h00	87
PECsed_2_days	27-May-1984-14h00	88
PECsed_4_days	29-May-1984-14h00	90
PECsed_7_days	01-Jun-1984-14h00	93
PECsed_14_days	08-Jun-1984-14h00	100
PECsed_21_days	15-Jun-1984-14h00	107
PECsed_28_days	22-Jun-1984-14h00	114
PECsed_42_days	06-Jul-1984-14h00	128
PECsed_50_days	14-Jul-1984-14h00	136

31/8/2019

378\_Cereals, spring\_R4\_Stream - report

PECsed\_100\_days 0.05459 02-Sep-1984-14h00 186  
\*-----  
\* Legend: - in table means PECsed is later than end of simulated period: 28-Feb-1985

\* Table: Maximum Time Weighted Averaged Exposure Content substance: P13

\*-----

* Content	Date	Daynr
* ug.kg-1		
*-----		
TWAECSed_1_day	0.4105 26-May-1984-08h00	87
TWAECSed_2_days	0.4024 27-May-1984-05h00	88
TWAECSed_4_days	0.3885 28-May-1984-11h00	89
TWAECSed_7_days	0.3694 31-May-1984-04h00	92
TWAECSed_14_days	0.3490 02-Jun-1984-13h00	94
TWAECSed_21_days	0.3169 09-Jun-1984-03h00	101
TWAECSed_28_days	0.2862 15-Jun-1984-12h00	107
TWAECSed_42_days	0.2367 29-Jun-1984-03h00	121
TWAECSed_50_days	0.2147 04-Jul-1984-15h00	126
TWAECSed_100_days	0.1305 23-Aug-1984-06h00	176

\*-----

\* End of TOXSWA REPORT: Exposure in Waterbody

\*-----

## Anexo 6. Ejemplo del reporte generado por PWC para clorpirifos

### Summary of Water Modeling of P13 and the USEPA Standard Pond

Estimated Environmental Concentrations for P13 are presented in Table 1 for the USEPA standard pond with the KSSorghumSTD field scenario. A graphical presentation of the year-to-year peaks is presented in Figure 1. These values were generated with the Pesticide Water Calculator (PWC), Version 1.52. Critical input values for the model are summarized in Tables 2 and 3.

This model estimates that about 2.7% of P13 applied to the field eventually reaches the water body. The main mechanism of transport from the field to the water body is by erosion (56.3% of the total transport), followed by runoff (40%) and spray drift (3.73%).

In the water body, pesticide dissipates with an effective water column half-life of 5.5 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 = 6.8 days) followed by hydrolysis (54.2 days), volatilization (59.2 days), and photolysis (3490.7 days).

In the benthic region, pesticide dissipates (49.7 days). The main source of dissipation in the benthic region is metabolism (effective average half-life = 49.8 days) followed by hydrolysis (31885.7 days). The vast majority of the pesticide in the benthic region (99.83%) is sorbed to sediment rather than in the pore water.

**Table 1. Estimated Environmental Concentrations (ppb) for P13.**

Peak (1-in-10 yr)	3.80
4-day Avg (1-in-10 yr)	2.32
21-day Avg (1-in-10 yr)	1.07
60-day Avg (1-in-10 yr)	0.583
365-day Avg (1-in-10 yr)	0.155
Entire Simulation Mean	0.102

**Table 2. Summary of Model Inputs for P13.**

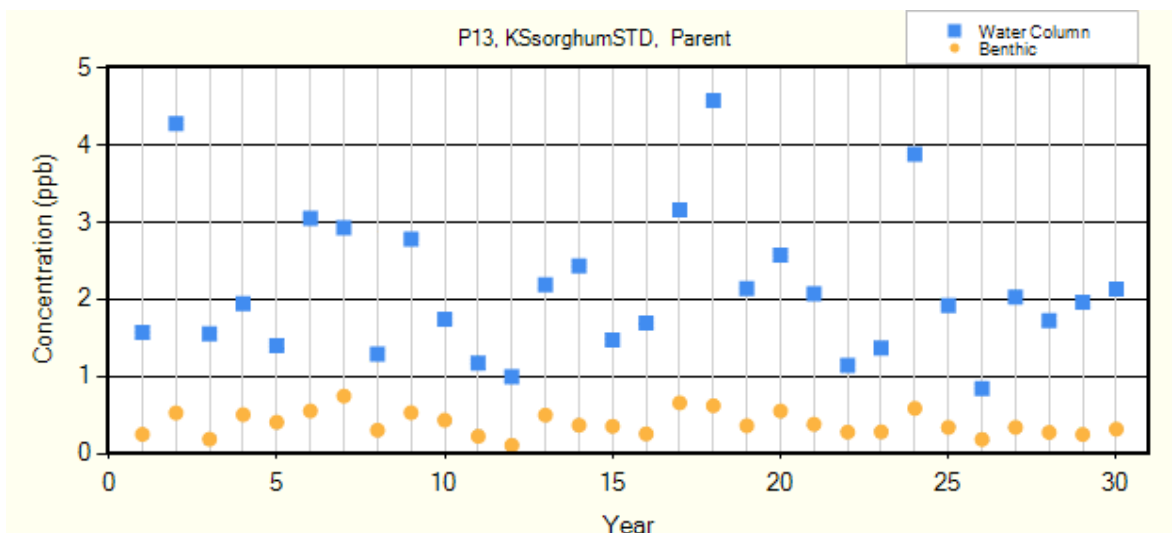
Scenario	KSSorghumSTD
Cropped Area Fraction	1
Koc (ml/g)	5509
Water Half-Life (days) @ 20 °C	5

Benthic Half-Life (days) @ 20 °C	36.5
Photolysis Half-Life (days) @ 40 °Lat	29.6
Hydrolysis Half-Life (days)	53.5
Soil Half-Life (days) @ 20 °C	386
Foliar Half-Life (days)	10
Molecular Weight	350.58
Vapor Pressure (torr)	0.00001144
Solubility (mg/l)	1.05
Henry's Constant	0.000205

**Table 3. Application Schedule for P13.**

Date Since Emergence	(Days)	Type	Amount (kg/ha)	Eff.	Drift
1		Ground	0.750	.99	.01

**Figure 1. Yearly Peak Concentrations**

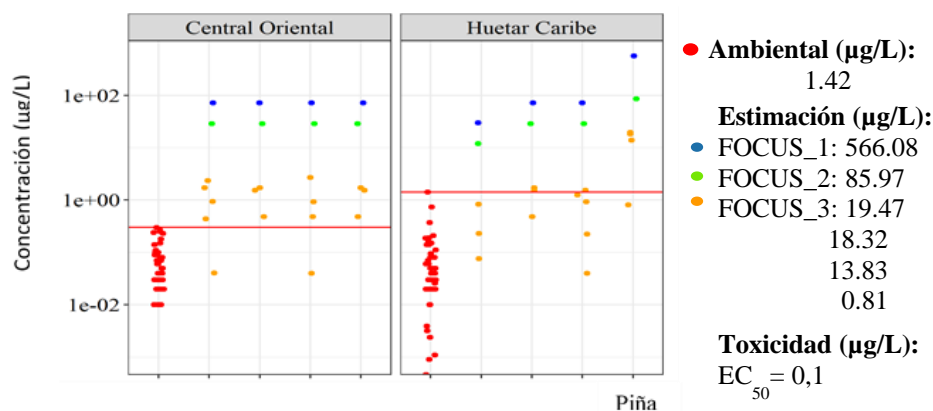


**Anexo 7.** Reportes generados por los modelos FOCUS y PWC

Todos los reportes generados están disponibles en el archivo digital adjunto.

**Anexo 8.** Toma de decisiones con base en la ERA utilizando modelos de cálculo de la exposición.

En general, la ERA se realiza con un enfoque escalonado que inicia con cálculos simples y conservadores que dan resultados de concentraciones estimadas altas. Si al relacionar estos resultados con los datos de toxicidad se concluye que el riesgo es aceptable (porque la exposición es menor que la toxicidad) entonces se toma una decisión de aprobar el uso del plaguicida. Si la conclusión es que el riesgo es inaceptable (porque la exposición es mayor que la toxicidad), se sube de escalón o nivel en busca de condiciones cada vez más específicas y así obtener un resultado de concentración estimada más bajo. En este proceso escalonado se continúa hasta obtener una concentración estimada que sea menor que la toxicidad; de lo contrario, el riesgo se mantendrá como inaceptable y no se podrá aprobar el uso del plaguicida. Se espera que el resultado del modelo esté por encima de la máxima concentración ambiental medida, de lo contrario se estaría asumiendo menos carga química de la que realmente ocurre.



Usando como ejemplo los resultados obtenidos con FOCUS para la estimación del uso de clorpirifos en el cultivo de piña en la región HC, se muestra que la toma de decisiones con FOCUS 1 y 2 es conservadora con respecto a la concentración ambiental medida, ya que las estimaciones son más altas que la máxima concentración ambiental medida.

Además, al momento de la ERA con los resultados con FOCUS 1 y 2 se concluye que el riesgo es inaceptable (exposición > toxicidad) y aun subiendo a nivel 3 (FOCUS 3) el riesgo se mantiene inaceptable. Esto incluso con una estimación de FOCUS 3 que está por debajo de la concentración ambiental medida máxima.