Universidad Nacional del Litoral

Facultad de Ciencias Agrarias

Evaluación del riesgo por plaguicidas

sobre las poblaciones de abejas *(Apis mellifera)*

Trabajo Final de Graduación

Maestrando: Esp. en Protección Vegetal (Ing. Agr.) Gonzalo Vallejos

Director: Ing. Agr. (Dipl.in Computing and Information Systems) Daniel Grenón

Codirectora: Dra. (Ing. Agr.) Alejandra Lutz

Fecha: 18/06/2025

Esperanza, Santa Fe.

Hoja de Aprobación

Este Trabajo Final de Graduación fue aprobado por la Universidad Nacional del Litoral como requisito parcial para optar al grado de Magister en Protección Vegetal.

Fecha y Lugar: a los 18 del mes de Junio, en la ciudad de Esperanza, provincia de Santa Fe.

Índice de Contenido

RESUMEN…… 5
SUMMARY…… 6
1. INTRODUCCIÓN…… 7
2. OBJETIVOS…… 13
3. DESARROLLO…… 13
a) Principales principios activos utilizados en la zona de estudio…… 13
b) Modelo conceptual de la dinámica poblacional de *Apis mellifera*…… 17
c) Factores de riego por el uso fitosanitarios sobre las poblaciones de abejas…… 23
c.1) Vías de Exposición de *A. mellifera* y sus posibles interacciones con el manejo fitosanitario de cultivos extensivos en las zonas de estudio…… 24
d) Riesgo del uso de fitosanitarios para cultivos extensivos sobre las abejas en las zonas de estudio…… 27
e) Caracterización del riesgo toxicológico sobre las poblaciones de abejas de los principales principios activos nombrados…… 27
f) Indice Apitox…… 30
f.1) Indicadores empleados en el Indice ApiTox…… 30
f.2) Sobre el procedimiento usado en el desarrollo del ApiTox…… 31
f.3)" Motor" de la lógica difusa del ApiTox…… 33
f.4) Correlación de los indicadores de Amenaza…… .36
f.5) Planillas de cálculo del ApiTox…… 38
g) Discusión…… 41
4. CONCLUSIONES…… 43
5. BIBLIOGRAFÍA…… 44

Índice de Figuras

Figura 1: Factores involucrados en la ecuación de riesgo…… 11
Figura 2: Ubicación de las zonas de estudio…… 14
Figura 3: Provincias con mayor número de colmenas…… 14
Figura 4: Diagrama de interrelaciones entre factores y procesos ecológicos en un hipotético sistema de vida de un insecto…… 18
Figura 5: Exposición de abejas melíferas a fitosanitarios sistémicos aplicados al suelo o como tratamiento de semillas…… 24
Figura 6: Exposición de abejas melíferas a fitosanitarios aplicados al follaje…… 26
Figura 7: Diferencias de asignación de valor entre la lógica clásica y la lógica difusa…… 32

Figura 8: Combinación de situaciones totalmente desfavorables y totalmente favorables de los indicadores seleccionados y el valor del impacto o riesgo asignado…….. 33
Figura 9: Hoja de cálculo Sensibilización…… 39
Figura 10: Hoja de cálculo ApiTox-Lote…….. 40
Figura 11: Hoja de cálculo ApiT……... 41
Figura 12: Riesgo por aplicación de glifosato en mayo: Bajo (3,14), sin condiciones adecuadas de temperatura ni floración para atraer las abejas…….. 42
Figura 13: Riesgo por aplicación de glifosato en el mismo sitio y cultivo, pero en enero: Moderado (4,61), se incrementa por causa de la mayor vulnerabilidad…… 43

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Evolución de la intensidad de uso de fitosanitarios en la Argentina.…… 7
Gráfico 2: Herbicidas más utilizados en los cultivos extensivos de la zona de estudio…… 15
Gráfico 3: Insecticidas más utilizados en cultivos extensivos en la región de estudio…… 15
Gráfico 4: Funguicidas más utilizados en cultivos extensivos en la región de estudio…… 16
Gráfico 5: Tasa de actividad de abejas según la temperatura ambiental…… 20
Gráfico 6: Tasa relativa de la actividad exterior de las abejas en función con la velocidad del viento…… 21
Gráfico 7: Modelo curva de población de abejas…… 23
Gráfico 8: Indicador: Utox…… 34
Gráfico 9: Indicador: Distancia a la colmena…… 34
Gráfico 10: Indicador: Temperatura del aire…… 35
Gráfico 11: Indicador: Floración de la vegetación……... 35
Gráfico 12: Indicador: Kow o PV…… 36
Gráfico 13: Correlación Kow : PV…… 37
Gráfico 14: Correlación DL50 : PV…….. 37
Gráfico 15: Correlación DL50 : Kow…….. 37
Gráfico 16: Correlación DL50 : Dosis aplicada…….. 38

Índice de Tablas

Tabla 1: Categorías toxicológicas de los plaguicidas establecidas en función de la DL50…… 28
Tabla 2: Clasificación de los principales principios activos citados…….. 29
Tabla 3: Definición de rangos y valores de riesgo del índice ApiTox. …… 42

Evaluación del riesgo por plaguicidas

sobre las poblaciones de abejas (*Apis mellifera*)

RESUMEN

El desarrollo científico y tecnológico de las últimas décadas propició la intensificación de las explotaciones agrícolas, con una gran dependencia de fitosanitarios para el control de adversidades bióticas (insectos, malezas y patógenos). Consecuentemente, se ha incrementado el uso de fitosanitarios a nivel mundial y, por ende, en Argentina. Las abejas y otros insectos polinizadores mejoran la producción de alimentos, ayudando a garantizar la seguridad alimentaria de la población mundial. Estos insectos están expuestos de manera constante a los productos fitosanitarios utilizados para el control de plagas en los cultivos. Mediante revisión bibliográfica se pudo identificar y caracterizar los principales factores que definen la dinámica poblacional de las abejas y el riesgo toxicológico de los principios activos más utilizados en las zonas de estudio; si bien todos los fitosanitarios pueden ocasionar daño, los insecticidas presentan mayor riesgo potencial de causar eventos toxicológicos. El índice predictivo "Apitox", desarrollado mediante un procedimiento basado en lógica difusa integrando parámetros relacionados con la toxicidad del principio activo y condiciones ambientales del manejo a realizar, puede evaluar el posible daño de las aplicaciones sobre las poblaciones de *Apis mellifera*. Este indicador constituye una herramienta de gran valor para predecir y anticipar el impacto de los tratamientos fitosanitarios sobre l poblaciones de abejas, aportando información crucial para la toma de decisiones de apicultores, productores agrícolas y asesores técnicos.

PALABRAS CLAVES: *APIS MELLIFERA*, APLICACIÓN, FITOSANITARIOS, TOXICIDAD, DAÑO, EVALUACIÓN, ÍNDICE.

SUMMARY

Scientific and technological developments in recent decades have led to the intensification of agricultural production, resulting in a heavy reliance on pesticides to control pests (insects, weeds, and pathogens). Consequently, pesticide use has increased worldwide and and Argentina is no exception. Bees and other pollinating insects improve food production, helping to ensure global food security. These insects are constantly exposed to pesticides applied for crop protection. Through a literature review, the main factors that define bee population dynamics and the toxicological risk of the most commonly used active ingredients in the areas under studywere identified and characterized. While all pesticides can cause harm, insecticides present a the highest riskof causing toxicological events. The “Apitox” predictive index, developed using a fuzzy logic-based procedure that integrates parameters related to the toxicity of the active ingredient and the environmental conditions of the application, can assess the potential impactof applications on Apis mellifera populations. This indicator represents a valuable toolfor predicting and anticipating the impact of treatments on bee populations, providing relevant information to beekeepers, farmers, and consultants.

KEYWORDS: *APIS MELLIFERA*, APPLICATION, PESTICIDES, TOXICITY, DAMAGE, EVALUATION, INDEX.

1. INTRODUCCIÓN

Los plaguicidas son una herramienta indispensable para la protección de cultivos en la agricultura moderna y en otras actividades del hombre, caracterizándose por su eficacia para limitar los efectos perjudiciales de una gran variedad de especies consideradas plagas (microorganismos patógenos, malezas e insectos plagas) (Arregui y Puricelli, 2016). Por lo tanto, el desarrollo científico y tecnológico llevó a que en las últimas décadas no exista en forma extendida un sistema de alta productividad agrícola sin la aplicación de plaguicidas. En gran parte del mundo, y en Argentina, se evidencia una tendencia sostenida en el incremento del uso de plaguicidas en las explotaciones agrícolas (Roser y Rosado, 2019) (Gráfico 1).

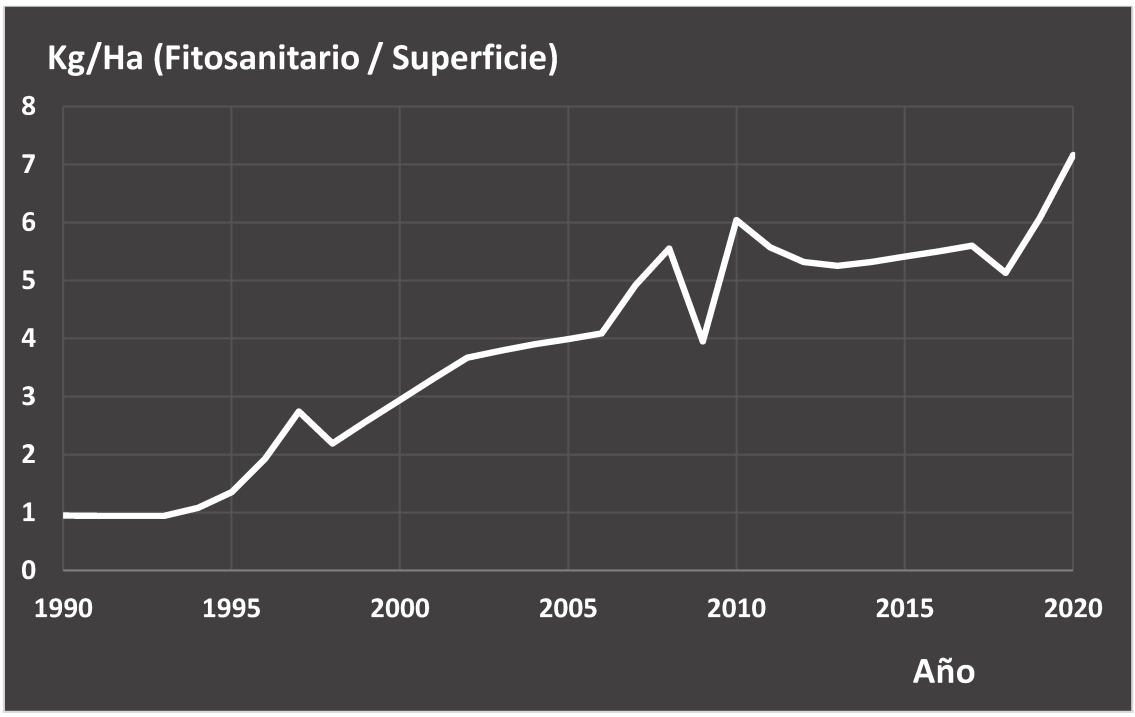


Gráfico 1. Evolución de la intensidad de uso de fitosanitarios en la República Argentina. (Fuente: Roser y Rosado, 2019).

Los plaguicidas son un insumo fundamental en la producción agrícola; no obstante, su uso puede tener efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente. En este sentido, es necesario considerar la contaminación ambiental y los riesgos para la salud humana al implementar estrategias de control de plagas. Los efectos de los plaguicidas pueden propagarse a zonas distantes de los lugares de aplicación y persistir durante largos períodos después de que el

xenobiótico ha ingresado al medio ambiente. Es responsabilidad de los Ingenieros Agrónomos contemplar no solo los beneficios agronómicos de los fitosanitarios, sino también los posibles efectos no deseados como ser generación de resistencias en las plagas, alteración de la biodiversidad, contaminación ambiental y riesgos para la salud, tanto de los habitantes rurales, como de poblaciones aledañas, o de especies domésticas y silvestres que no son blanco de las aplicaciones de plaguicidas (Devillers y Pham-Delegue, 2002). De acuerdo a esto, la identificación del riesgo ambiental implica la comprensión técnica de los efectos indeseables que pueden ocasionar las prácticas de control de plagas a los agro-ecosistemas y a otros sistemas vinculados.

Los fitosanitarios se comercializan en formulaciones que incluyen un único principio activo o mezclas de ellos, o al momento de preparar el caldo de aplicación, se hacen las combinaciones correspondientes de las distintas materias activas, para el control de las principales plagas. Actualmente, existen en el mercado argentino más de 500 principios activos fitosanitarios (CASAFE, 2024), y en los últimos 15 años, se han introducido al menos un 40% de ellos, algunos pertenecientes a grupos químicos ya existentes, aunque con distintas propiedades (Arregui y Puricelli, 2016). De todos los tipos de fitosanitarios (plaguicidas, reguladores de crecimiento, repelentes, etc.), el presente trabajo se centrará en los efectos dañinos de los plaguicidas sobre las abejas.

Un plaguicida, cuando se aplica al suelo o al cultivo, ingresa a un medio ambiente dinámico e inmediatamente comienza a moverse desde un compartimento ambiental a otro (aire, aguas superficiales y sub-superficiales, suelo y cadena trófica), degradándose *in situ* o difundiéndose o desplazándose hacia otros espacios geográficos (Klein et al., 2007). En este sentido, existen ingredientes activos que se degradan rápidamente, y por lo tanto tienen menor riesgo de causar daños ambientales fuera del sitio de aplicación; mientras que, aquellos que son más persistentes, pueden trasladarse a otros sitios y ser más perjudiciales (Galán y Grenón, 2016).

La abeja de la miel, *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae), es esencial para el mantenimiento de la biodiversidad de los ecosistemas. Son pequeñas en tamaño, pero cumplen una enorme labor eco-sistémica, puesto que su importancia radica en que, gracias a que se alimentan y transportan

el polen de una flor a otra, miles de plantas pueden reproducirse, sobrevivir y producir los alimentos que los seres humanos consumimos. En los ecosistemas agrícolas y agroforestales las abejas son las que realizan la mayor parte de la actividad polinizadora; pero en los ecosistemas naturales como bosques tropicales, bosques secos y bosques andinos, son las especies de abejas nativas las que polinizan y mantienen estos ambientes (Carvajal, 2020).

Los cambios que ocurren dentro del ciclo de vida de un organismo se corresponden con procesos determinados por sus características genéticas y que son afectados por factores del ambiente en el que crecen y se desarrollan. Los ciclos de vida de los insectos también se adaptan a los cambios que suceden a lo largo del año (estaciones, ciclo de los cultivos), y al grado de heterogeneidad de un área (sistema productivo, área no cultivada y flora nativa, etc.) (Pascale y Damario, 2004). Una colonia de abejas está constituída por tres castas: una reina, cientos de zánganos y miles de obreras, donde cada uno desempeña funciones específicas dentro de la organización social. En este sentido, una colmena de A. mellifera puede albergar una población de hasta 60 mil individuos (Persano, 1996).

De acuerdo con la Organización de las Naciones unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2018), "las abejas y otros insectos polinizadores mejoran la producción de alimentos de 2 mil millones de pequeños agricultores en todo el mundo, ayudando a garantizar la seguridad alimentaria de la población mundial". En este sentido, se han realizado varios estudios en Francia, Estados Unidos e Italia, donde se ha determinado que el 85% de la fauna polinizadora de las plantas cultivadas, está compuesto por *A. mellifera* (Southwick y Southwick, 1992).

La presencia de las abejas constituye un excelente indicador de la salud medioambiental de un ecosistema (principalmente la relacionada con los productos más tóxicos para ellas) (Herbert et al., 2011). Con respecto a esto, desde hace varios años se viene registrando una disminución significativa de las colonias de abejas melíferas en todo el mundo (Kulhanek et al., 2017; Requier et al., 2018), hecho atribuible a la acción combinada de factores estresantes de origen biológico, ambientales, químicos y nutricionales; que debilitan las colonias de abejas (Nazzi y Pennacchio, 2014; Di Pascuale et al., 2016). Dentro de los compuestos químicos, los fitosanitarios utilizados para el control de plagas en los sistemas agrícolas representan los compuestos que mayor riesgo

tienen sobre la población de las abejas melíferas, ocasionando efecto letales y subletales (Tosi y Nieh, 2019; Tosi et al., 2022).

En nuestro país, el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) es el organismo encargado del registro de productos fitosanitarios, requiriendo para ello la realización de estudios toxicológicos sobre los organismos no blancos. Además, en el uso responsable de los plaguicidas, con el objetivo de minimizar el daño y los posibles residuos, es necesarios tener en cuenta las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), que incluyen aquellas acciones tendientes a reducir los riesgos de contaminación físicos, químicos y biológicos en la producción primaria desde el inicio del barbecho a la cosecha (CASAFE, 2024).

En la actualidad, en las áreas de producción apícola del país, hay escasos estudios acerca de la presencia e identificación de compuestos contaminantes provenientes de plaguicidas que afectan la población de los polinizadores. Dentro de los efectos subletales que pueden causar los plaguicidas a las abejas (efectos ocasionados por la exposición a dosis subletales de productos, que no necesariamente ocasionan la muerte pero que repercuten en la biología o comportamiento del organismo expuesto), se mencionan alteraciones en el aprendizaje, memoria y dinámica social y espacial de las abejas dentro de la colmena (Devillers et al., 2003; Herbert et al.,2011; Crall et al., 2018), en las funciones motoras y la fototaxia[1] (Tosi et al, 2017), en la regulación de la temperatura corporal, en la orientación y navegación durante el vuelo de las abejas, en la búsqueda de alimento, en la performance reproductiva y en la inmunidad hacia enfermedades (Chmiel et al., 2020), entre otros efectos perjudiciales.

Evaluar los efectos negativos de los fitosanitarios no solo implica considerar la toxicidad de las sustancias utilizadas, sino también comprender los distintos factores que determinan la probabilidad y el grado de daño que pueden ocasionar. En este sentido, el **riesgo** se define como la combinación de las probabilidades de ocurrencia de un evento potencialmente peligroso y sus consecuencias negativas, es decir, la posibilidad de sufrir algún daño o pérdida. Para la presente

[1] Las abejas, como muchos insectos, exhiben fototaxia, es decir, una respuesta a la luz, que puede ser positiva (atraídas hacia la luz) o negativa (evitan la luz), dependiendo de su especie y ciclo de vida.

tesis, los factores que componen la ecuación de riesgo son: la amenaza y la vulnerabilidad (CASAFE, 2024). (Figura 1).

Por un lado, la **Amenaza** es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales. Por lo tanto, la amenaza de un plaguicida se determina en función de:

- el **Peligro** (toxicidad y persistencia del plaguicida en el ambiente),
- la **Intensidad** (dosis aplicada) y
- la **Frecuencia** (cantidad de aplicaciones e intervalos entre ellas).

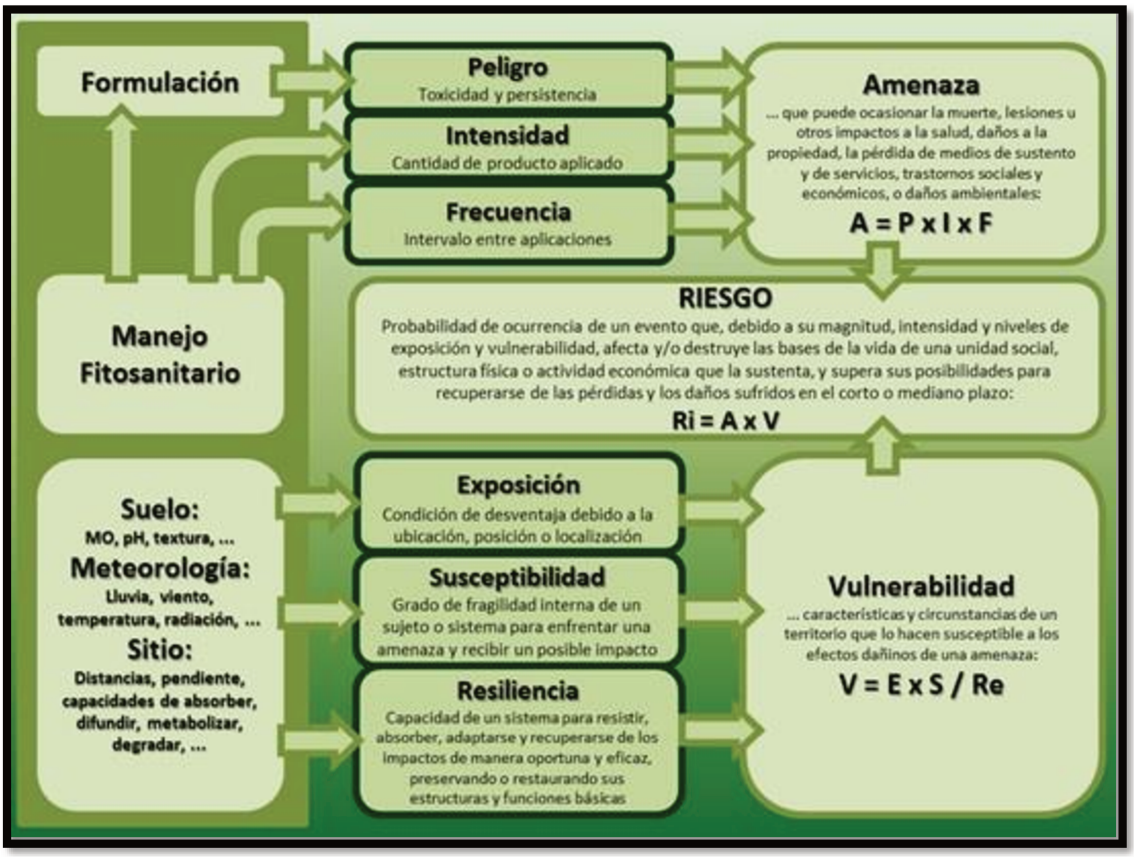


Figura 1. Factores involucrados en la ecuación de riesgo utilizada en el presente trabajo.

La **Vulnerabilidad** depende de las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen sensibles a los efectos dañinos de una amenaza, y se compone de varios factores:

-de la **Susceptibilidad** del sitio o población bajo riesgo (por ejemplo, los niños al tener mayor superficie de piel por kilogramo de peso son más susceptibles a la absorción dérmica de tóxicos),

-de la **Exposición** (por ejemplo, por cercanía a los sitios de aplicación: los más expuestos son los aplicadores, los productores y las familias rurales) y

-de la **Resiliencia** (capacidad de recuperación del impacto recibido).

Así procederemos a analizar el riesgo de los manejos fitosanitarios a diversos niveles de complejidad:

Nivel 1: Peligro de cada principio activo a partir de sus propiedades intrínsecas.

Nivel 2: Amenaza de cada manejo fitosanitario según peligro del principio activo, dosis y frecuencia de aplicaciones.

Nivel 3: Agregación de las amenazas de los tratamientos fitosanitarios de un cultivo y de las fechas de los tratamientos, estimando las Vulnerabilidades específicas para las poblaciones de abejas (a partir de la probabilidad de condiciones ambientales y ubicaciones relativas entre las colmenas y los cultivos), posibilitando así la generación de índices de Riesgo.

En las provincias de Córdoba y Santa Fe, la producción agropecuaria se caracteriza por la diversificación de cultivos y la presencia de importantes cadenas de valor. En ambas, el cultivo de soja, maíz y trigo, son los de mayor superficie, además de la producción ganadera bovina y láctea, donde es fundamental la utilización de fitosanitarios, para la obtención de *commodities* en cantidad y calidad, tanto para consumo interno, como de exportación.

Por lo anteriormente expuesto, es fundamental desarrollar estrategias que permitan relevar y reportar el uso de fitosanitarios en el sector productivo, con el fin de adoptar medidas adecuadas frente al riesgo que estas sustancias representan para las abejas. Dada la estrecha relación entre el modelo agrícola actual y el uso de fitosanitarios, se vuelve imprescindible promover prácticas agronómicas que sean compatibles con la conservación de la entomofauna polinizadora (Carvajal, 2020). Para ello, resulta clave contar con herramientas que permitan anticipar los riesgos ambientales asociados a las decisiones de manejo en el control de plagas.

2. OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el riesgo de la aplicación de fitosanitarios sobre las poblaciones de abejas en los cultivos extensivos de Córdoba y Santa Fe.

Objetivos Específicos

a. Identificar los principales principios activos utilizados en las zonas de estudio.
b. Desarrollar un modelo conceptual de la dinámica poblacional de *Apis mellifera*.
c. Identificar procesos y factores de riesgo por el uso de plaguicidas sobre las poblaciones de abejas.
d. Determinar el riesgo del uso de fitosanitarios para cultivos extensivos, sobre las abejas en las zonas de estudio.
e. Caracterizar el riesgo toxicológico de estos principios activos, sobre las poblaciones de abejas.
f. Desarrollar o adaptar herramientas para estimar el riesgo por plaguicidas sobre las poblaciones de abejas.

3. DESARROLLO

a) Principales principios activos utilizados en las zonas de estudio

Las zonas de estudio corresponden a las Provincias de Córdoba y Santa Fe (Figura 2), donde hay alta proporción de cultivos con manejos fitosanitarios basados en plaguicidas y, simultáneamente, alta cantidad de colmenas: Córdoba y Santa Fe están entre las cuatro provincias argentinas con mayor cantidad de colmenas (SENASA, 2021) (Figura 3). Los sistemas de producción analizados pertenecen a los cultivos extensivos de cereales (maíz, sorgo y trigo), oleaginosas (soja y girasol), pasturas (alfalfa, avena, raigrás, trébol blanco y trébol rojo) y otros cultivos con menor área sembrada como colza, garbanzo, centeno y maní.

Las zonas de estudio mencionadas corresponden a 3 regiones:

- Centro - Sur de Santa fe.
- Centro - Norte de Córdoba.
- Sur de Córdoba.



Figura 2. Ubicación de las zonas de estudio.

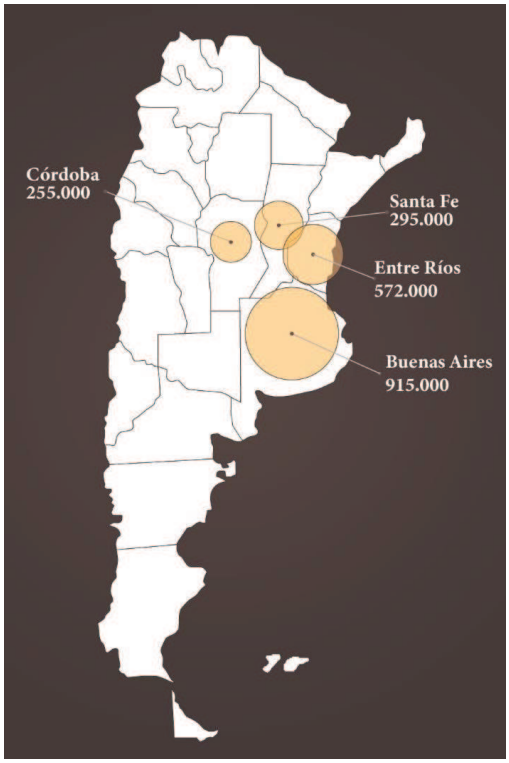


Figura 3. Provincias con mayor número de colmenas.

A partir de un trabajo anterior (Vallejos, 2023), se pudieron identificar los principios activos más utilizados en las zonas de estudio, mediante encuestas a empresas que fabrican y comercializan agroquímicos y agropecuarias, ubicadas en las provincias de Córdoba y Santa Fe.

En total fueron 20 principios activos de herbicidas, con diferentes modos de acción, y como se observa en el Gráfico 2, los de mayor comercialización son Glifosato y 2,4 D, le siguen en importancia Atrazina, Cledotin y Haloxifop (herbicidas graminicidas), el desecante Paraquat, y en menor cantidad Flumioxazin, S – Metolaclor, Sulfentrazone y Metsulfuron. En algunos casos los plaguicidas nombrados vienen en mezclas o, se hacen las combinaciones correspondientes de los distintos productos, cuando se arma el caldo de aplicación.

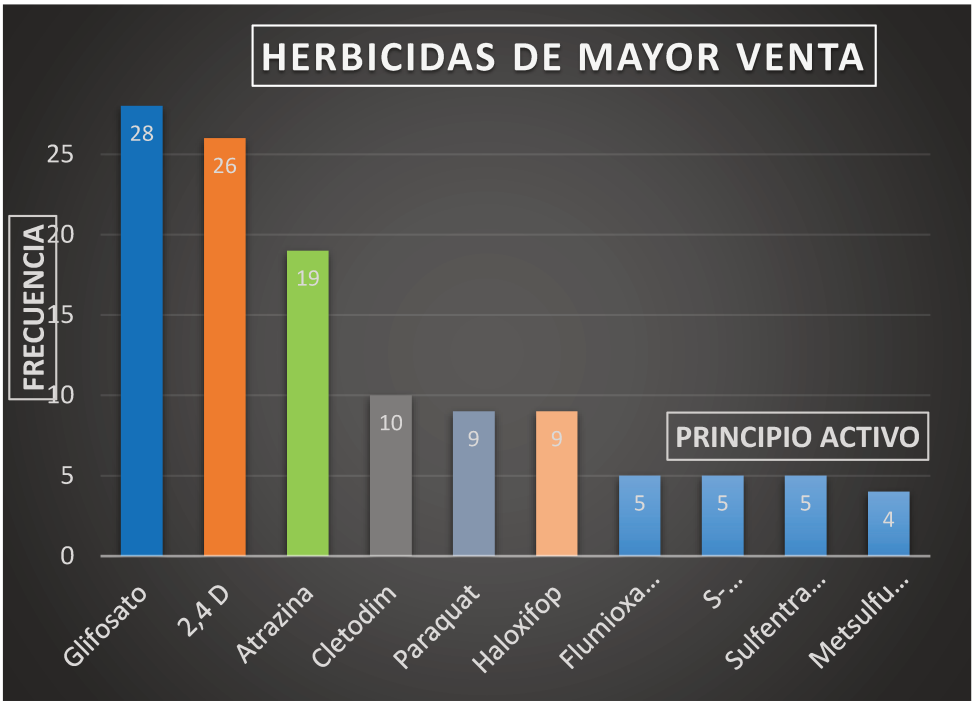


Gráfico 2. Herbicidas más utilizados en los cultivos extensivos de la zona de estudio.

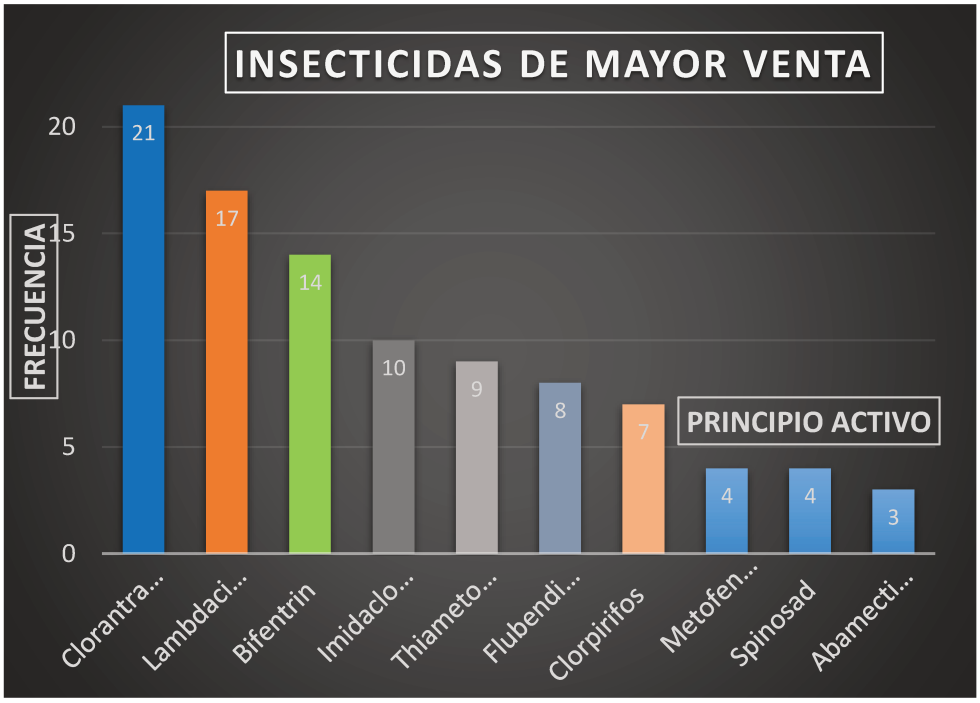


Gráfico 3. Insecticidas más utilizados en cultivos extensivos en la región de estudio.

De un total de 24 principios activos evaluados, los insecticidas de mayor demanda son Clorantraniprole y Lambdacialotrina, le sigue en importancia el Bifentrin, Imidacloprid, Tiametoxan Flubendiamide y Clorpirifos (actualmente prohibido), mientras que Metofenoxide, Spinosad y Abamectina, son utilizados en menor proporción (Gráfico 3). Al igual que los

herbicidas, los insecticidas pueden encontrarse disponibles comercialmente como mezclas de principios activos o como formulaciones individuales, permitiendo en este último caso la combinación de diferentes principios activos durante la preparación del caldo de aplicación (CASAFE, 2024).

Los funguicidas de mayor venta son mezclas de estrobirulinas y triazoles. Recientemente las empresas de agroquímicos lanzaron al mercado principios activos de la familia química de las carboxamidas, con el fin de aumentar la eficacia de control e impedir que se generen resistencias de los patógenos.

De los 19 principios activos fungicidas registrados (Gráfico 4), Azoxistrobina y Ciproconazole son los más relevantes en este estudio, le siguen en importancia Epoxiconazole, Pyraclostrobin y Picoxystrobin, luego una gran variedad de funguicidas de distintas familias químicas, entre los que se encuentran Tebuconazole, Pydiflumetofen, Difenoconazole, Fluxapyroxad, Prothiconazole, Trifloxistrobin, Carbendazim y Mancozeb (CASAFE, 2024).

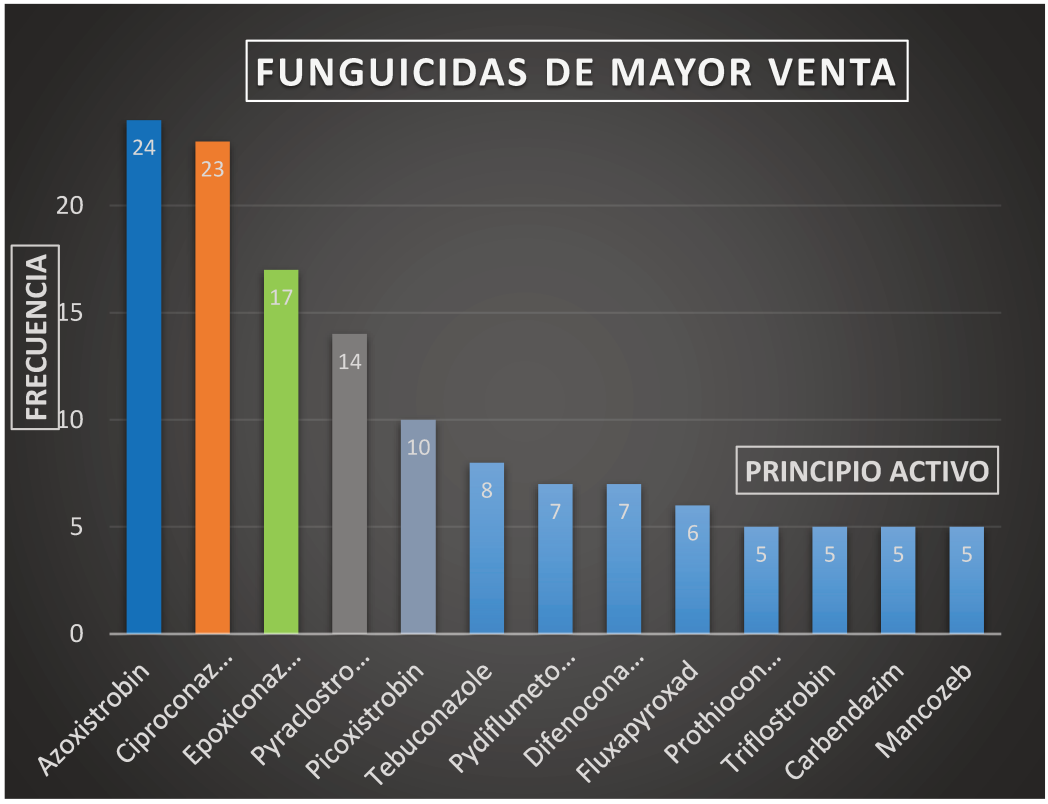


Gráfico 4. Funguicidas más utilizados en cultivos extensivos en la región de estudio.

b) Modelo conceptual de la dinámica poblacional de *Apis mellifera*

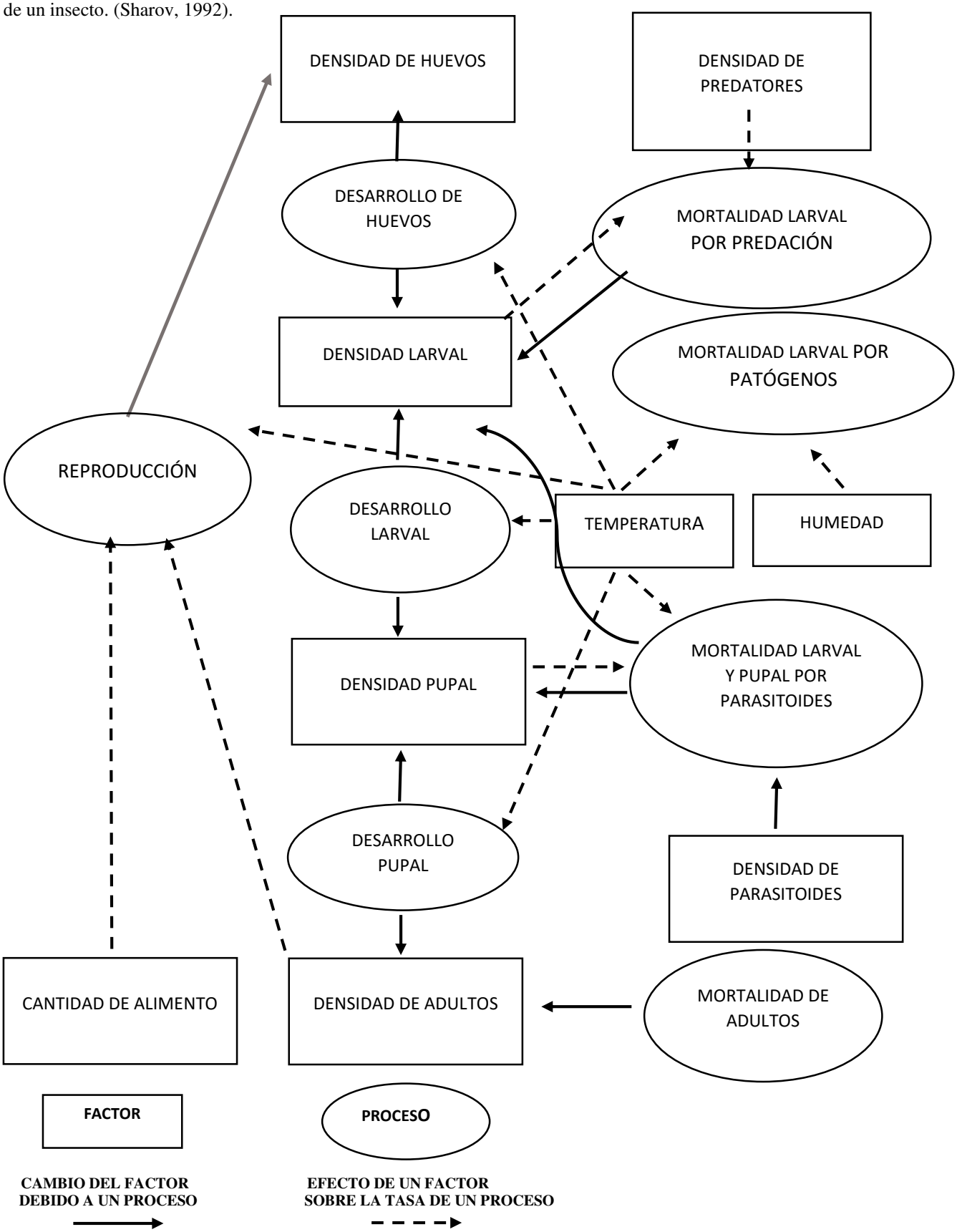
A partir de revisión bibliográfica de artículos científicos nacionales e internacionales, se desarrolló un modelo conceptual de la dinámica poblacional de las abejas domésticas y sus posibles interacciones con los manejos fitosanitarios de cultivos extensivos en las zonas de estudio.

Los cambios que ocurren dentro del ciclo de vida de un organismo se corresponden con procesos determinados por sus características genéticas y que son afectados por factores del ambiente en el que crecen y se desarrollan. Los ciclos de vida de los insectos también se adaptan a los cambios que suceden a lo largo del año (estaciones del año, ciclo de los cultivos), y al grado de heterogeneidad de un área (proporción de cada cultivo, área no cultivada y flora nativa, etc.) (Pascale y Damario, 2004).

Para realizar un análisis de la dinámica poblacional es útil adoptar el concepto de "Sistema de Vida" (Clark, 1967), el mismo se define como la parte del agro-ecosistema que determina la existencia, abundancia y evolución de una población en particular. Está compuesto por la población sujeto y su ambiente efectivo, que incluye a todos los componentes del ecosistema que poseen un efecto significativo, directo o indirecto, sobre esa población. Los componentes del ciclo de vida de un insecto son: la población misma del insecto con su distribución de edades, estados de desarrollo, sexo y otras características; los recursos, tanto alimentarios como lugares de invernación, pupación, oviposición, refugios, enemigos naturales (predadores, parasitoides, patógenos) y el ambiente (agua, suelo y temperatura, además de los xenobióticos que nos ocupan) (Sharov, 1992) (Figura 4).

Todo cambio (evento) en los valores de cada uno de los componentes del Sistema de Vida, genera un Proceso. Nacimientos, muertes, migración de un organismo, contacto con alimento o predador, crecimiento y desarrollo son ejemplos de eventos ecológicos. Cada proceso ecológico tiene su tasa específica medida por el número de eventos ecológicos que suceden en la unidad de tiempo. Natalidad y mortalidad específica, tasa de desarrollo son ejemplos de tasa de procesos.

Figura 4. Diagrama de interrelaciones entre factores y procesos ecológicos en un hipotético sistema de vida de un insecto. (Sharov, 1992).



Los componentes del sistema también pueden ser llamados Factores, porque afectan a los procesos y, por lo tanto, la Dinámica del sistema de vida. Los factores afectan la tasa de los procesos: la temperatura actúa sobre la tasa de desarrollo del insecto, la densidad de predador y la presa tienen efecto sobre la tasa de mortalidad larval por predación. (Mareggiani y Pelicano, 2013).

Existen factores que son extrínsecos al sistema, por ejemplo la temperatura, ya que no están afectados por los procesos biológicos del sistema en estudio, sino por otros que ocurren a nivel atmosférico. El resto de los factores son intrínsecos ya que se dan dentro del marco del sistema de vida. (Mareggiani y Pelicano, 2013).

Los principales factores que actúan en un sistema de vida de Apis mellifera son:

Factores Extrínsecos:

• **Temperatura.** Los insectos son organismos poiquilotermos, o sea, varían su temperatura corporal según los cambios de la temperatura ambiental. La temperatura de un organismo regula todas las reacciones que ocurren a nivel de su metabolismo y, en consecuencia, el crecimiento y desarrollo. Todos los procesos por los que pasa un insecto desde que nace: alimentación, mudas sucesivas, pupación, reproducción (fecundidad, edad a la primera reproducción, duración del periodo reproductivo), están afectados por la temperatura. A bajas temperaturas todo ocurre más lentamente; los ciclos de vida se alargan en duración e incluso puede llegar a aparecer quiescencia invernal hasta que la temperatura aumente. También ocurre que, a latitudes menores, la mayor temperatura genera no solo ciclos más cortos, sino también mayor número de generaciones en el año (Mareggiani y Pelicano, 2013).

Apis mellifera es una especie de abeja que requiere de condiciones de temperatura (34-35°C) dentro de la colmena para su óptimo desarrollo (Le Conte y Navajas, 2008), por lo que la temperatura del ambiente representa el factor abiótico más importante que influye directamente en el desarrollo de la cría y por consiguiente en el comportamiento y actividades de la población. (Mendizabal, 2005; Ali, 2011).

La temperatura mínima para el vuelo de las abejas es de 12 °C, la temperatura óptima para la actividad de vuelo es de 22-28º C, pero la actividad continúa hasta aproximadamente 38º C antes de disminuir (Burrill et al., 1981) (Gráfico 5).

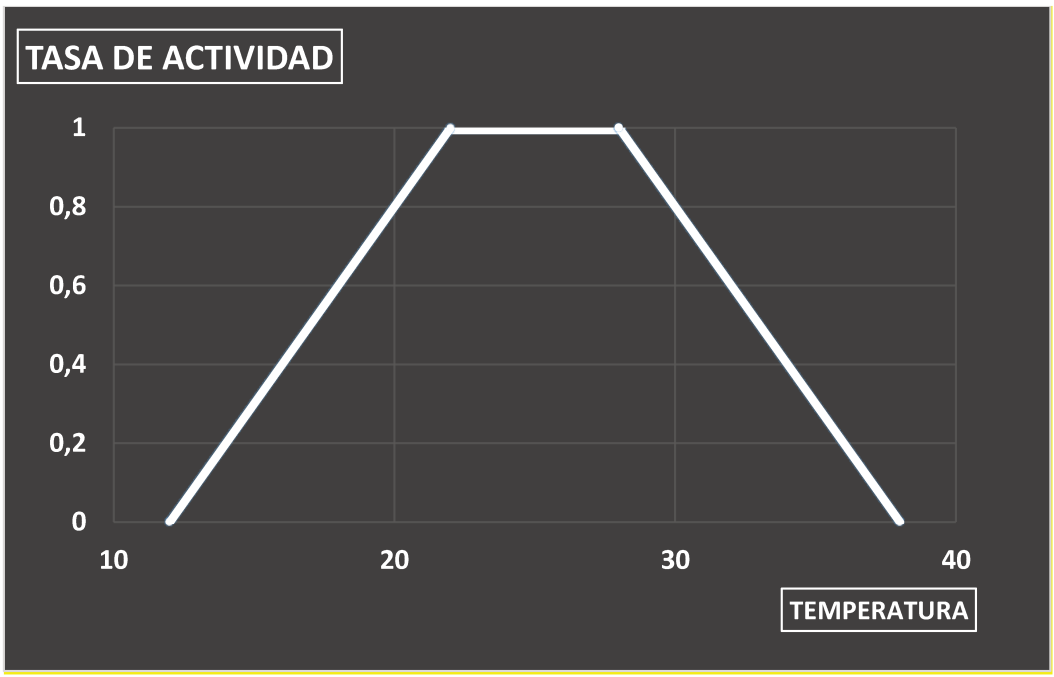


Gráfico 5: Tasa de actividad de abejas según la temperatura ambiental.

• **Humedad.** La capacidad de la cutícula de los insectos para evitar pérdidas de agua presenta gran variabilidad entre las especies. Así, hay algunas especies que toleran climas áridos y otras no, dependiendo de la naturaleza de su exoesqueleto u otras adaptaciones que posean; hay estados de desarrollo más susceptibles a la desecación como el huevo o pupa. Además, la humedad es un factor determinante en el desarrollo de patógenos, especialmente hongos.

Con respecto a la presencia de humedad relativa y la dinámica de pecoreo de las abejas (actividad externa de las abejas obreras adultas dedicada a la búsqueda, recolección y transporte de recursos vitales para la colmena como néctar, polen, agua y propóleo) se correlacionan de forma negativa (Abrol, 2010; Abou-Shaara, 2014) y, aunque no influye en algún estadio en particular, interviene en la capacidad de pérdida y adquisición de calor en el interior de la colmena (Delgado, 1984), involucrando flujos de energía en el transporte del néctar y el polen, además de un incremento en el gasto energético para la eliminación de humedad del alimento almacenado, sin una humedad

relativa de alrededor del 80%, cesa la cría (esta se deshidrata con facilidad a través de su fina piel). Por ello se ven abejas recogiendo ávidamente agua al inicio de la cría, en primavera temprana, pues si falta agua en la colmena, la cría se paraliza (Kovac y Stabentheiner, 2011).

• **Viento.** El viento ligero por debajo de los 16 km/hora y la distancia de vuelo dentro de los 600 m no afecta las tasas de alimentación de las abejas en las inflorescencias; la velocidad de vuelo de *Apis mellifera* es de 22 Km/h, por lo que mayores velocidades de viento afectan su normal movimiento (Mayer *et al*., 1985) (Gráfico 6).

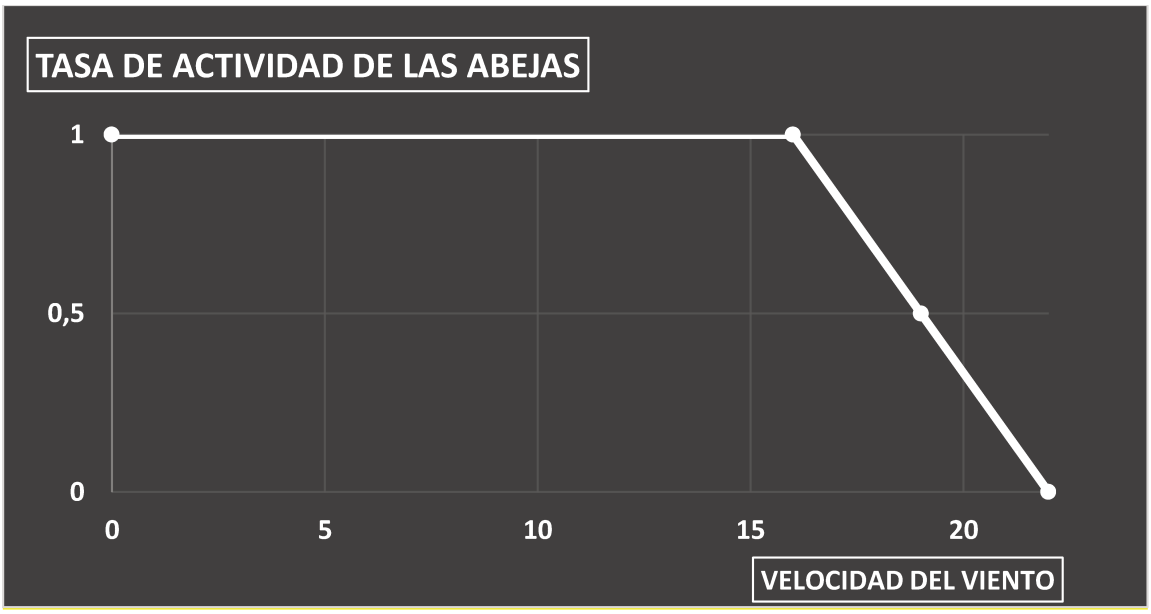


Gráfico 6: Tasa relativa de la actividad exterior de las abejas en función con la velocidad del viento.

• **Lluvias.** La ocurrencia de precipitaciones limita las actividades de pecoreo, limitando el tiempo de vuelo, lo que implica utilizar el alimento acumulado en las colmenas (Delgado, 1984), así como la pérdida de néctar y el polen en las plantas, reduciendo la cantidad y calidad del alimento disponible (Mendizabal, 2005). Por lo tanto, los cambios en los patrones de lluvias podrían reducir en cantidad y calidad la disponibilidad de alimento, en los meses que debiera ser abundante o, prolongar las estaciones de lluvia y reducir la actividad de pecoreo (Van Engelsdorp y Meixner, 2010).

Factores Intrínsecos:

• **Disponibilidad de recursos.** La disponibilidad de alimento es clave para el crecimiento de una población, dado que es uno de los principales determinantes de la capacidad de carga de un ecosistema. Ya se ha visto que los insectos tienen regímenes de alimentación variados, por lo que la diversidad de especies y su abundancia en un área están determinada en parte por la proporción y abundancia de especies vegetales que componen cada paisaje. ***Apis mellifera*** necesita por lo menos 2 alimentos esenciales (Katzenelson, 1965):

a) Energéticos: la abeja encuentra en la miel su fuente de energía para poder realizar sus distintas funciones: caminar, volar, vigilar, limpiar, etcétera.

b) Plásticos: en el grano de polen elementos que han de formar su cuerpo o reponer sus tejidos.

• **Acción de enemigos naturales.** Se define como enemigo natural a los organismos que causan mortalidad o afectan la reproducción. Entre estos organismos encontramos microorganismos patógenos (virus, bacterias, hongos, nemátodes), predatores y parasitoides. Estos organismos son comunes en los agro-escosistemas, provocando mortalidad natural que adquiere muchas veces características de epizootias (Mareggiani y Pelicano, 2013). Podemos citar entre los más importantes de nuestro país, a la Varroasis, Polillas de la cera, Piojo de la abeja, Hormigas, Nosemosis, Acariosis, Amebiasis, Micosis y Enfermedades de cría (Loque europea y Loque americana) (Persano, 1996).

• **Variaciones genéticas.** Con la enorme variedad de genes que aportan las abundantes razas de todos los rincones del mundo, las posibilidades de desarrollar mejores abejas deben de ser muy grandes. Una sola especie superior no es suficiente: se necesitan mejores razas adaptadas a los distintos ambientes y métodos de manejo, así como razas hibridas criadas para cumplir propósitos específicos, tales como la polinización de determinados cultivos. Las primeras abejas que trajeron los primeros colonizadores y que se extendieron por toda américa hasta convertirse en las abejas comunes, fueron muy probablemente de la raza parda europea *Apis mellifera mellifera*, porque sus características eran similares. Las peores entre éstas eran la susceptibilidad a la Loque

europea, la inclinación a la enjambrazón, a picar, y una fuerte tendencia a salir de los panales y la colmena al manipularla. En la actualidad, la abeja italiana importada en 1859 es la raza dominante, debido a sus características de comportamiento, adaptabilidad y rendimiento (Persano, 1996).

En resumen, las estimaciones de la población de abejas que se presentan a continuación no están diseñadas para indicar un nivel específico de actividad, sino como una guía general para indicar los meses en que las abejas melíferas probablemente visiten la cubierta vegetal en flor y las plantas de cultivo. La actividad real de las abejas variará con factores específicos del sitio y de la fecha, como la densidad de las flores, el flujo de néctar y el clima reciente, entre otros factores (Katzenelson, 1965; SENASA, 2011) (Gráfico 7).

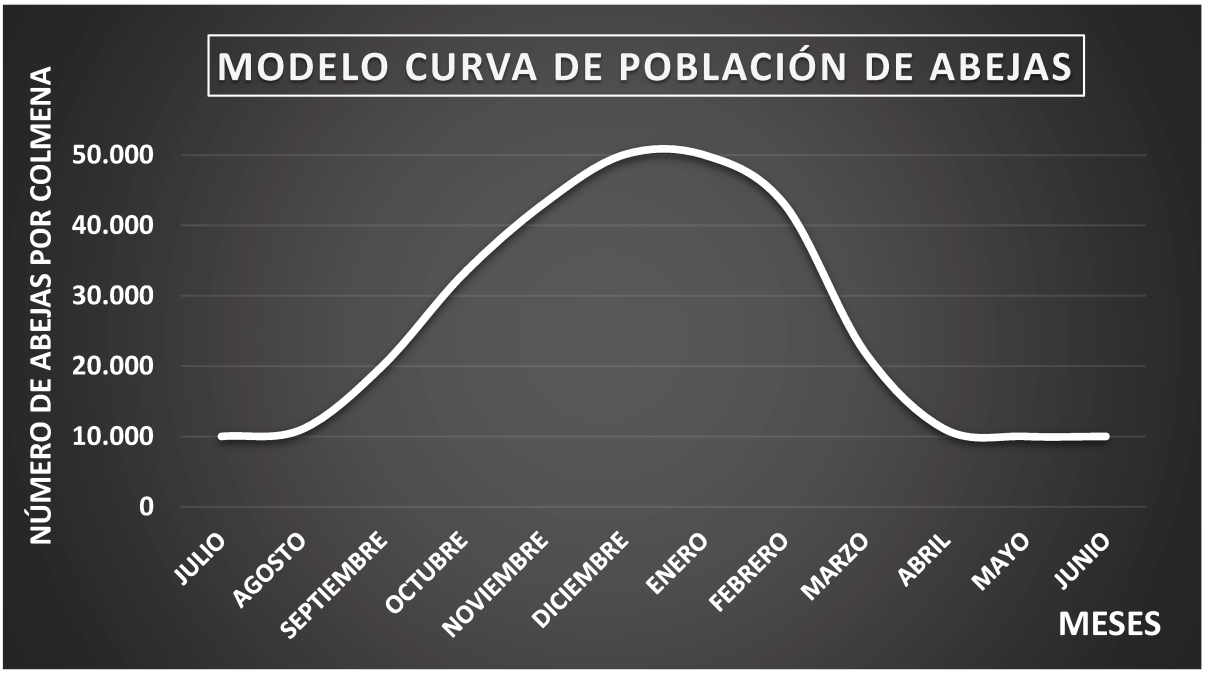


Gráfico 7. Modelo curva de población de abejas (SENASA, 2011).

c) Factores de riesgo por el uso de fitosanitarios sobre las poblaciones de abejas

Mediante la información brindada por Fischer y Moriarty (2014), se identificaron aquellos componentes, procesos y condiciones determinantes o predisponentes, para definir los riesgos de impacto ambiental de los fitosanitarios sobre las poblaciones de abejas. A continuación, se abordan en detalle cada uno de los factores en cuestión.

c.1) Vías de Exposición de *Apis mellifera* y sus posibles interacciones con el manejo fitosanitario de cultivos extensivos en las zonas de estudio

Las abejas pueden estar expuestas a fitosanitarios a través de varias vías, según el tipo de aplicación (foliar, dirigidas al suelo o tratamiento de semillas). Por lo tanto, la ruta de exposición determinará el procedimiento de evaluación de riesgos que debe aplicarse, así como los datos de toxicidad que se requieren. Las rutas primarias de transferencia de residuos de fitosanitarios a las abejas se indican con flechas gruesas, y las rutas menores con flechas delgadas (Figuras 5 y 6).

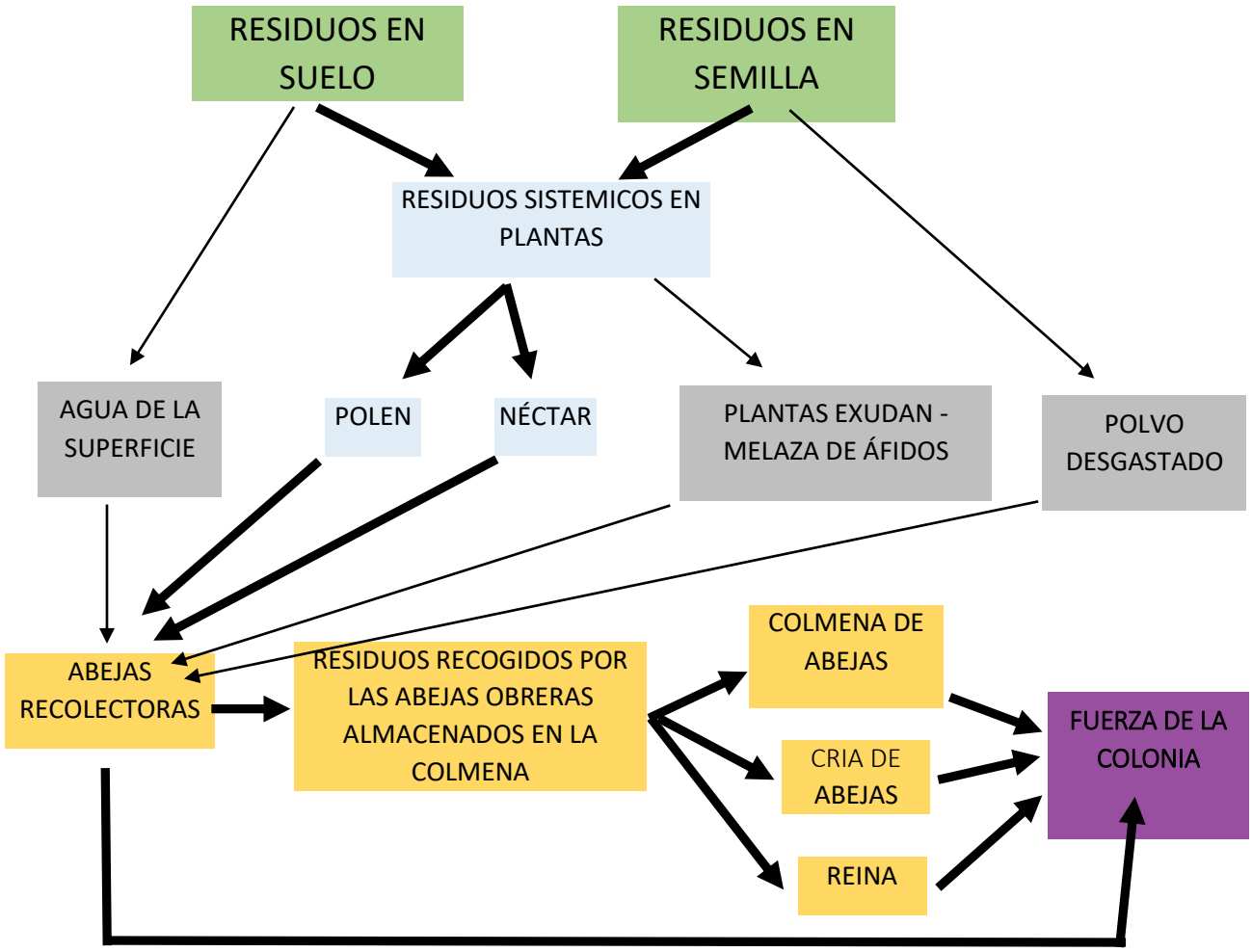


Figura 5. Exposición de abejas melíferas a fitosanitarios sistémicos aplicados al suelo o como tratamiento de semillas (Fischer y Moriarty, 2014).

Para fitosanitarios aplicados al suelo o como tratamiento curasemillas, las vías principales de exposición para las abejas son los residuos presentes en el polen y el néctar; sin embargo, la ingestión de residuos presentes en aguas superficiales, exudados de plantas (por ejemplo, líquido

de gutación) y polvo de semillas desgastadas (restos de material), pueden ser otras vías de exposición (Fischer y Moriarty, 2014) (Figura 5).

Por otro lado, las abejas obreras recolectoras pueden estar expuestas a los plaguicidas que se aplican al follaje, tanto por contacto como por ingestión oral; mientras que en tratamientos curasemillas, la exposición por contacto disminuye. En estos tratamientos, y dado que el producto químico se aplica al suelo, se supone que el potencial de exposición por contacto es limitado. (Fischer y Moriarty, 2014).

En los ***fitosanitarios que se aplican al follaje***, la principal vía de exposición de las abejas obreras probablemente sea la vía oral a través la ingestión de néctar, principal alimento consumido por las abejas obreras recolectoras (Figura 6). El polen también se recolecta en los pelos del cuerpo de las abejas obreras, o en pequeñas bolsas (canastas de polen) en sus patas traseras. El néctar y el polen recolectados ingresan a la colmena, donde se incorporan a las reservas de alimentos, son consumidos por las abejas y, a su vez, se utilizan para producir alimentos para la reina y la cría en desarrollo. Si la concentración del principio activo es lo suficientemente alta, los efectos tóxicos en las abejas recolectoras, las abejas de colmena, la cría de abejas o la reina, pueden resultar en una reducción de la fecundidad de la reina, el éxito del desarrollo de la cría o la supervivencia de las abejas adultas. Si estos efectos son lo suficientemente severos o perduran en el tiempo, puede resultar en un efecto negativo significativo en la fuerza de la colonia (Fischer y Moriarty, 2014).

Cuando un plaguicida se aplica como pulverización foliar a las plantas de cultivo, las rutas principales de exposición de las abejas recolectoras son a través del contacto con las gotas que contienen fitosanitarios durante la pulverización, y mientras las abejas recolectoras están en la búsqueda de alimento, o cuando entran en contacto con residuos de fitosanitarios depositados en las superficies de las plantas (Fischer y Moriarty, 2014) (Figura 5). Si el fitosanitario aplicado hizo contacto con flores, pueden aparecer residuos en el polen y el néctar, ingresando estos compuestos a la colmena, donde son procesados y almacenados como alimento que luego utilizarán las abejas de la colmena, la cría de abejas y la reina. Otra vía posible de exposición es a través del agua superficial (por ejemplo, charcos) que las abejas utilizan como fuente de agua

(Krupke et al., 2012). Las rutas primarias de transferencia de residuos se indican con flechas gruesas, las rutas menores con flechas delgadas en la Figura 5. Si el nivel de exposición es lo suficientemente alto, entonces pueden morir en la medida en que se reduce la fuerza de la colonia (por ejemplo, un evento de muerte de abejas grandes).

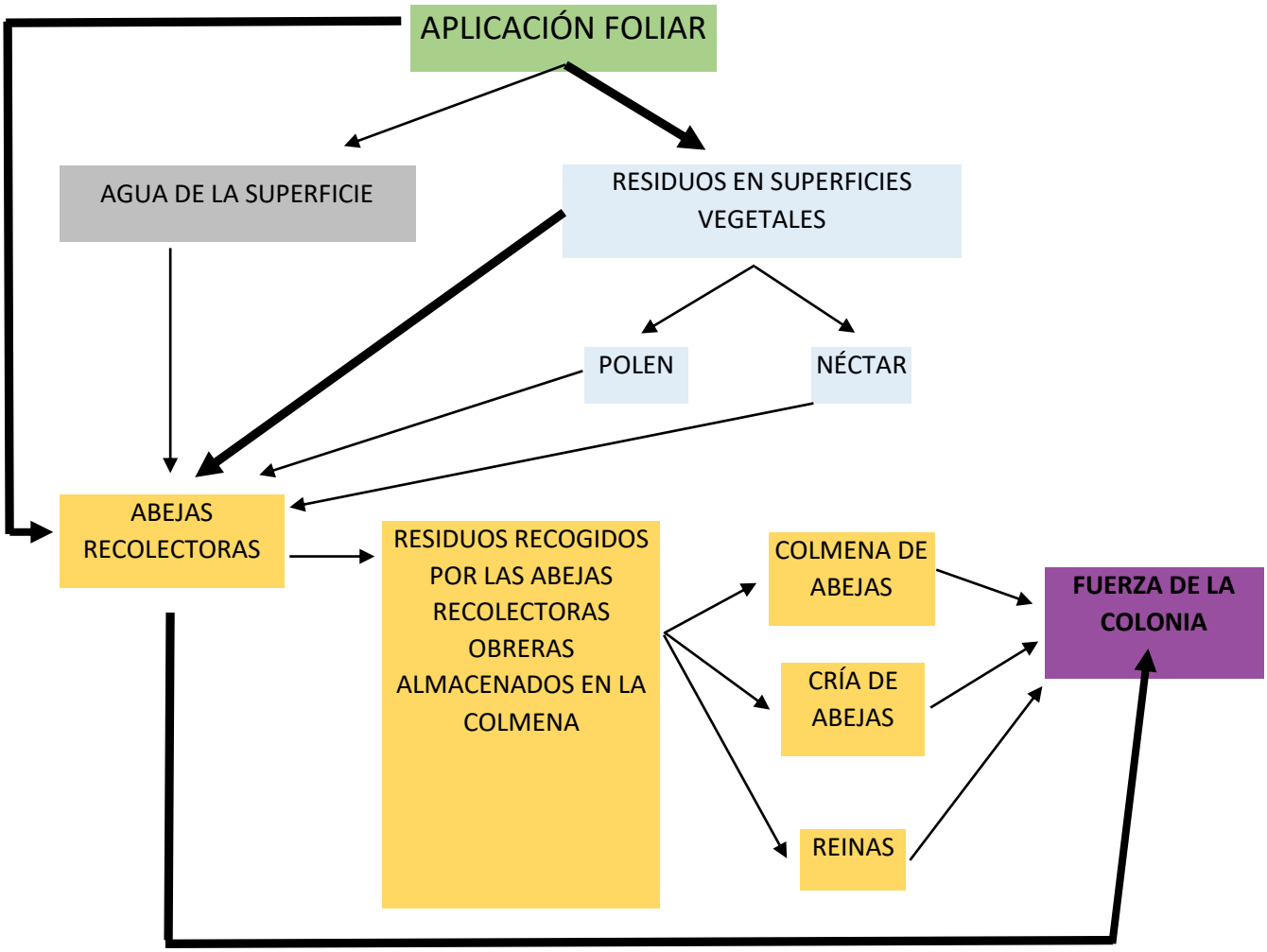


Figura 6. Exposición de abejas melíferas a fitosanitarios aplicados al follaje (Fischer y Moriarty, 2014).

Por otra parte, las abejas de la colmena (nodrizas, guardianas, estadios juveniles, reina, etc) también pueden estar expuestas a los fitosanitarios, pero no se espera que los niveles de exposición sean tan altos como los de las abejas recolectoras, a menos que la colmena se rocíe durante la aplicación. Si los residuos de agroquímicos en el área de forrajeo son altos, las abejas de la colmena pueden estar expuestas mediante el polen y néctar contaminado con estos residuos y que fueron llevados a la colmena por las abejas pecoreadoras, además de la exposición durante el aseo

social, pueden producirse efectos tóxicos en las abejas y resultar en un efecto negativo significativo en la fuerza de la colonia (Fischer y Moriarty, 2014).

d) Riesgo del uso de fitosanitarios para cultivos extensivos sobre las abejas en las zonas de estudio

Las características físicas y químicas de los productos fitosanitarios y las condiciones ambientales durante la aplicación determinan su persistencia y destino en el ambiente. De este modo, una vez aplicados, los plaguicidas pueden ser transportados por el aire, entrar en el suelo, ingresar a los cuerpos de agua (superficiales o subterráneos), o ser absorbidos por las plantas y ser incorporados por los animales (cadena trófica). Además, las propiedades biológicas de las moléculas plaguicidas son indicadores que determinan su toxicidad y potencial de bioacumulación (Arregui et al., 2010).

El impacto ambiental de cualquier plaguicida resulta de la combinación de exposición (principal componente de la vulnerabilidad) y toxicidad (principal componente de la amenaza).

La **toxicidad** deriva de la composición química y de la concentración inicial de la sustancia usada.

La **exposición** es consecuencia de su dinámica en el ambiente (absorción en seres vivos, adsorción en coloides minerales y orgánicos, solubilización y difusión en agua, evaporación, escurrimiento, lixiviación, degradación), la cual es condicionada por las características bio-físico-químicas, tanto del principio activo, como las del sitio en que se aplica y según las circunstancias meteorológicas bajo las cuales evoluciona: lluvias/riego, radiación, temperatura, humedad relativa (Arregui et al., 2010).

e) Caracterización del riesgo toxicológico sobre las poblaciones de abejas de los principales principios activos nombrados

Los productos fitosanitarios se inscriben en el Registro Nacional de Terapéutica Vegetal de acuerdo a lo establecido por el Decreto Nº 3489/58 y el Decreto Nº 5769/59, en los términos del Manual de Procedimientos, Criterios y Alcances para el Registro de Productos Fitosanitarios en la República Argentina, aprobado por Resolución SAGPyA Nº 350/99. El registro de

agroquímicos requiere que se realicen pruebas toxicológicas específicas en las abejas melíferas, como las requeridas por Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria SENASA (2019). Estas pruebas deben seguir protocolos específicos para (1) evaluar el nivel de selectividad del plaguicida para las abejas melíferas y (2) satisfacer los requisitos reglamentarios de fitosanitarios de un país determinado. Deben realizarse las Buenas Prácticas de Laboratorio.

La evaluación del riesgo potencial que representa para los insectos polinizadores el uso de productos fitosanitarios, está compuesta por el estudio de: a) la toxicidad oral aguda; b) la toxicidad dermal aguda; c) índice de exposición a la toxicidad (TER); y d) resultados de pruebas de semicampo y de campo (p. ej., mortalidad de abejas directa o diferida), que destacan el impacto en el desarrollo de la cría, las habilidades de alimentación, etc. La toxicidad oral aguda (a) y dermal aguda (b), se expresan como **Dosis Letal Media (DL50)** oral y dermal (microgramo/abeja), y se definen como: "la dosis letal que mata al 50% de la población en estudio, por vía sistémica o de contacto".

Los riesgos toxicológicos para cada plaguicida nombrado en este estudio, se han establecido de acuerdo a la información proporcionada por la Guía de Productos Fitosanitarios de la Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes (CASAFE), la Base de datos de propiedades de plaguicidas (PPDB) y Base de datos sobre biopesticidas (PPB). En la Tabla 1, se detallan los valores críticos (o umbrales), según las principales propiedades de los fitosanitarios, para poder caracterizar el riego toxicológico sobre las poblaciones de *A. mellifera,* de los principios activos seleccionados (CASAFE, 2024).

Tabla 1: Categorías toxicológicas de los plaguicidas establecidas en función de la DL50.

Altamente tóxico	**Menor a 0,001 microgramos/abeja.**
Moderadamente tóxico	**De 0,001 a 10 microgramos/abeja.**
Ligeramente tóxico	**De 10 a 100 microgramos/abeja.**
Virtualmente no tóxico	**Mayor a 100 microgramos/abeja.**

La variedad de principios activos: herbicidas, insecticidas y funguicidas nombrados, comprenden a todas las categorías toxicológicas que existen, desde virtualmente no tóxico hasta altamente tóxico sobre las abejas, donde cada uno tiene sus propias características y un efecto individual propio sobre dichos organismos benéficos (Tabla 2) (CASAFE, 2024).

Tabla 2: Clasificación toxicológica de los principales principios activos citados.

Tipo	Principio Activo	Categoría CASAFE
Herbicidas	Paraquat	Moderadamente tóxico
	Metsulfuron	Ligeramente tóxico
	Sulfentrazone	Ligeramente tóxico
	S-Metolaclor	Ligeramente tóxico
	2,4-D	Ligeramente tóxico
	Atrazina	Virtualmente no tóxico
	Cletodim	Virtualmente no tóxico
	Glifosato	Virtualmente no tóxico
	Haloxifop	Virtualmente no tóxico
	Flumioxazina	Virtualmente no tóxico
Insecticidas	Zetametrina	Altamente tóxico
	Abamectina	Altamente tóxico
	Imidacloprid	Altamente tóxico
	Spinosad	Altamente tóxico
	Tiametoxam	Altamente tóxico
	Lambdacialotrina	Altamente tóxico
	Clorpirifos	Altamente tóxico
	Bifentrin	Altamente tóxico
	Clorantraniliprole	Virtualmente no tóxico
	Metoxifenozide	Virtualmente no tóxico
	Flubendiamida	Virtualmente no tóxico
Funguicidas	Azoxistrobina	Ligeramente tóxico
	Carbendazim	Ligeramente tóxico
	Prothioconazole	Ligeramente tóxico
	Piraclostrobin	Ligeramente tóxico
	Epoxiconazole	Ligeramente tóxico
	Tebuconazole	Ligeramente tóxico
	Ciproconazole	Virtualmente no tóxico
	Difenoconazole	Virtualmente no tóxico
	Fluxapyroxad	Virtualmente no tóxico
	Pydiflumetofen	Virtualmente no tóxico
	Mancozeb	Virtualmente no tóxico
	Picoxistrobin	Virtualmente no tóxico
	Trifloxistrobin	Virtualmente no tóxico

f) Índice ApiTox

Los índices son útiles porque son sencillos de utilizar, demandan pocos datos y son fáciles de procesar. Estas mismas ventajas atentan contra su generalidad y su precisión, por lo tanto, hay que buscar un equilibrio entre la practicidad de empleo y la exactitud de sus resultados.

Los índices son como los semáforos: nos permiten orientar nuestro manejo, pero hay que tener cuidado en complementar sus indicaciones con criterios de adecuación a las circunstancias del entorno en ese momento: de la misma forma, los índices deben ser utilizados conociendo cómo están estructurados, qué presunciones se utilizaron en su construcción y bajo cuáles circunstancias no deben ser tenidos en cuenta.

Un índice de riesgo debe contemplar tanto las amenazas como la vulnerabilidad bajo la cual se aplica el plaguicida. Otra cuestión es tratar de integrar la totalidad de las aplicaciones realizadas en un cultivo, como la posibilidad de que haya residualidad luego de finalizado el cultivo (situación que no será considerada en la presente versión del índice propuesto). En el caso de integrar la totalidad de aplicaciones en un sitio, solo consideramos la sumatoria de los riesgos de cada principio activo. No se consideran los riesgos de los formulados en su totalidad ni las posibles interacciones entre ellos dado que:

(1) la legislación actual no requiere los datos de la composición de los coadyuvantes e inertes y su proporción en el formulado, y

(2) no se disponen de estudios que permitan cuantificar las posibles sinergias tóxicas entre diferentes principios activos o formulados.

f.1) Indicadores empleados en el índice ApiTox

Para la **Amenaza**, en el caso del Apitox se consideraron como relevantes las variables de toxicidad aguda para las abejas y las dosis utilizadas (la relación entre estas dos variables es expresada como Unidades Tóxicas: Dosis aplicada/DL50 abejas), el Coeficiente octanol-agua (Kow) como indicador de absorción y persistencia del plaguicida en la planta (y su posible migración hacia el polen y el néctar) en el caso de aplicaciones previas a la floración (EPA, 2014), y la Presión de vapor (PV) para aplicaciones durante o posteriores a la floración (riesgo por

contacto e inhalación por parte de las abejas dado que se presupone alta probabilidad de presencia de los insectos a partir de la floración).

Desde el punto de vista de la **Vulnerabilidad** se consideraron:

- la **distancia** entre el sitio bajo tratamiento y las colmenas más cercanas como indicador tanto de posibilidades de deriva del plaguicida como de distancia de vuelo de las abejas desde la colmena hacia el sitio tratado (máximo vuelo de 4000 m, máximo riesgo de exposición por deriva o vuelo para distancias menores a 1000 m: estas distancias varían mucho en la bibliografía [animaldiversity, HAL], pero se tomaron estos valores como promedio de los consultados y según lo referido por Persano, 1996)
- la **temperatura promedio del aire** para la época de aplicación como indicador de actividad de las abejas fuera de la colmena;
- **floración del cultivo o vegetación espontánea en el sitio**, lo cual atrae a las abejas hacia el área bajo tratamiento.

f.2) Sobre el procedimiento usado en el desarrollo del ApiTox

En el desarrollo del Apitox se aplica la lógica difusa (LD).

El uso de la LD en la Evaluación del impacto ambiental (EIA) provee un método adecuado para enfrentar las incertidumbres y subjetividades propias e inherentes en la percepción y control de los complejos sistemas ambientales (Flores y Mendoza, 2025; Peche y Rodríguez, 2009), dado que en la valoración y diseño de estos se suelen presentar barreras de carácter ideológico, de procedimiento y metodológico para la selección, ponderación e integración de los criterios de evaluación seleccionados y la desigual calidad de la información disponible (García Leyton, 2019).

La LD es una teoría matemática que permite formalizar la representación de la imprecisión, la incertidumbre y la subjetividad de conjuntos de datos. Al contrario de la lógica clásica, en LD existen diferentes grados de pertenencia entre verdadero y falso (Figura 7). Es decir, una proposición lógica es, al mismo tiempo, parcialmente verdadera y parcialmente falsa (LANCIS, 2023).

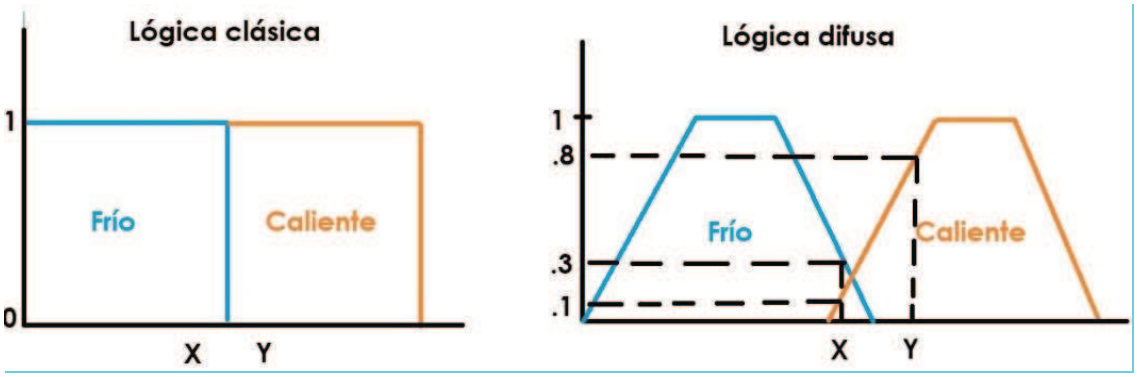


Figura 7. Diferencias de asignación de valor entre la lógica clásica y la lógica difusa.

El concepto de LD fue introducido para modelar incertidumbres por Zadeh (1965). La mayoría de las incertidumbres asociadas con sistemas complejos son el resultado de la imprecisión, la falla para llevar a cabo las mediciones requeridas, la falta de conciencia o la ambigüedad. La forma humana de razonamiento no es nítida. Los humanos ven multitud de posibilidades más allá de blanco o negro, verdadero o falso, unos o ceros de la forma de razonamiento de la computadora. La técnica de la teoría de la LD es un medio perfecto para abordar la incertidumbre asociada con el déficit de información, la complejidad y la inexactitud de los conjuntos de datos de la mayoría de los problemas encontrados en las industrias. La formulación adecuada de las reglas de la LD con las variables de entrada y el visor de reglas correctos ha eliminado el rigor y la molestia de desarrollar modelos matemáticos para resolver problemas. Los sistemas convencionales basados en reglas no han logrado integrar el razonamiento humano y el razonamiento computacional de tal manera que las computadoras puedan asistir a los humanos en la toma de decisiones ante un número infinito de posibilidades. La LD ha llenado con éxito esta laguna (Okwu et al., 2019):

(a) Méritos: los modelos matemáticos de LD son verdaderos medios para transformar el razonamiento humano en un conjunto útil de reglas que podrían implementarse fácilmente utilizando una computadora; los modelos de LD son capaces de manejar cualquier problema no lineal; los modelos de LD son técnicas vitales para abordar problemas estocásticos complejos que no pueden resolverse con modelos matemáticos ordinarios; los modelos de LD son robustos y encuentran aplicación en escenarios de déficit de información; los modelos difusos se consideran herramientas apropiadas en la toma de decisiones genérica.

(b) Desventajas: Algunas de las desventajas incluyen que los expertos involucrados en la resolución de problemas suelen tener dificultades para organizar sus ideas; puede haber sesgos e inconsistencias; otro problema con la LD es que el aumento en el número de subconjuntos difusos por variable de entrada provoca un aumento excepcionalmente alto en el número de reglas. Esto podría resultar en la acumulación de restricciones. A pesar de estas desventajas, los sistemas de LD se han aplicado con éxito en diversas áreas de investigación, como empresas manufactureras, operaciones de exploración y producción petrolera, problemas de transporte, industrias químicas y muchas otras áreas de la actividad humana (Park et al., 2010).

Este método se ha usado en varios trabajos de desarrollo de índices de riesgo por el empleo de plaguicidas (Van der Werf y Zimmer, 1998; Roussel y Cavalier, 2000; Ferraro et al., 2003; Assaghir et al., 2009; Arregui et al., 2010; Ferraro y de Paula, 2022; Gunawan y Utama, 2024).

f.3) "Motor" de la lógica difusa del ApiTox

En el armado del "Motor" (procedimiento matemático para los cálculos de riesgo), se asignan valores tanto a los umbrales a partir de los cuales se considerarán totalmente desfavorables o totalmente favorables cada uno de los indicadores como al peso relativo de cada indicador en la combinación con los restantes (Figura 8), basado en el procedimiento "Sugeno Fuzzy Model" (Takagi y Sugeno, 1985).

UTox	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Dist Colm	D	D	D	D	D	D	D	D	F	F	F	F	F	F	F	F	D	D	D	D	D	D	D	D	F	F	F	F	F	F	F	F
Temperat	D	D	D	D	F	F	F	F	D	D	D	D	F	F	F	F	D	D	D	D	F	F	F	F	D	D	D	D	F	F	F	F
Floración	D	D	F	F	D	D	F	F	D	D	F	F	D	D	F	F	D	D	F	F	D	D	F	F	D	D	F	F	D	D	F	F
Kow/PV	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F
Impacto	1,00	0,95	0,93	0,88	0,92	0,87	0,85	0,80	0,38	0,35	0,34	0,32	0,34	0,31	0,30	0,28	0,23	0,20	0,19	0,17	0,19	0,16	0,15	0,13	0,05	0,04	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,00

Figura 8. Combinación de situaciones totalmente desfavorables (D) y totalmente favorables (F) de los indicadores seleccionados y el valor del impacto o riesgo asignado.

Los umbrales y los impactos relativos para cada uno de los indicadores seleccionados son:

UTox: Se considera la variable más significativa con un impacto relativo de 0,55. Los umbrales son 0 (cero) para Totalmente Favorable y mayor a 40 UTox para Totalmente Desfavorable (Gráfico 8).

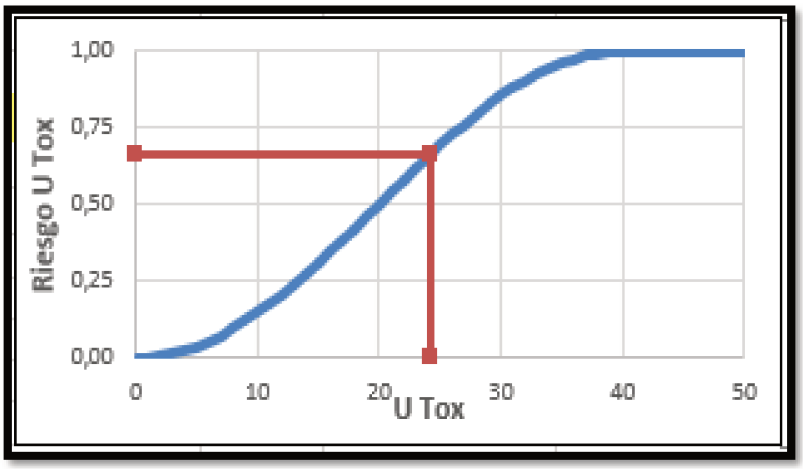


Gráfico 8. Indicador UTox.

Distancia a la colmena: La variable más importante para determinar la vulnerabilidad (impacto relativo 0,25), dado que sirve para cualquier época del año, sin importar las condiciones ambientales (temperatura) o del sitio (floración del cultivo y/o de la vegetación espontánea), que determinan la actividad de las abejas. Distancias mayores a 4.000 m totalmente favorables y distancias menores a 1.000 m Totalmente Desfavorables (Gráfico 9).

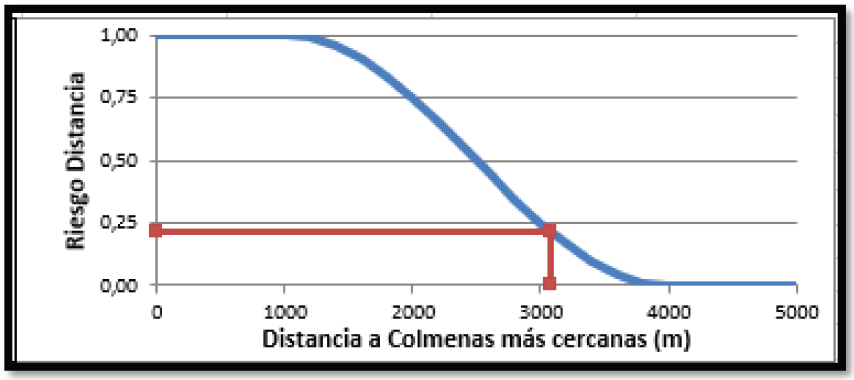


Gráfico 9: Indicador: Distancia a la colmena.

- **Temperatura del aire**: Define el rango de temperatura ambiental, que se considera como más adecuado para la actividad de las abejas fuera de la colmena (impacto relativo 0,08). Totalmente Favorable para temperaturas menores 12 °C y mayores a 38 °C, y Totalmente Desfavorable a la temperatura óptima de 25 °C (Gráfico 10).

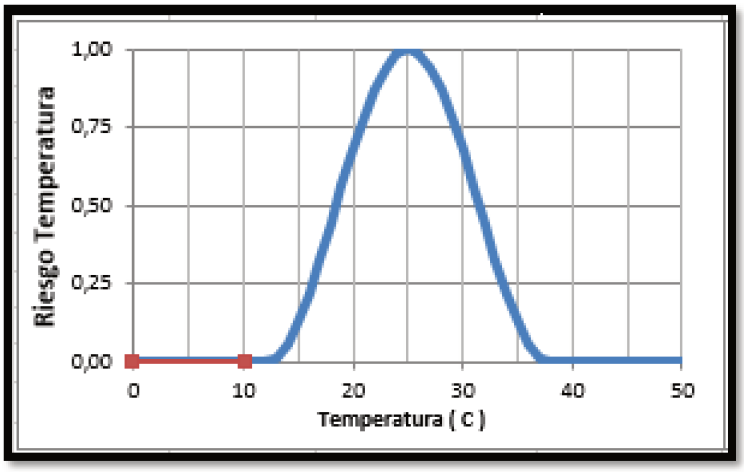


Gráfico 10. Indicador: Temperatura del aire.

- **Floración de la vegetación** (cultivada y/o espontánea): Si existen flores que atraigan a las abejas en el sitio bajo tratamiento, se considera que se aumentan las posibilidades de presencia de abejas cerca de los plaguicidas aplicados (impacto relativo 0,07). Los límites para condiciones Totalmente Favorables (fuera del período de floración), como para los Desfavorables (dentro del período de floración) se definen por las fechas de inicio y finalización de la floración (Gráfico 11).

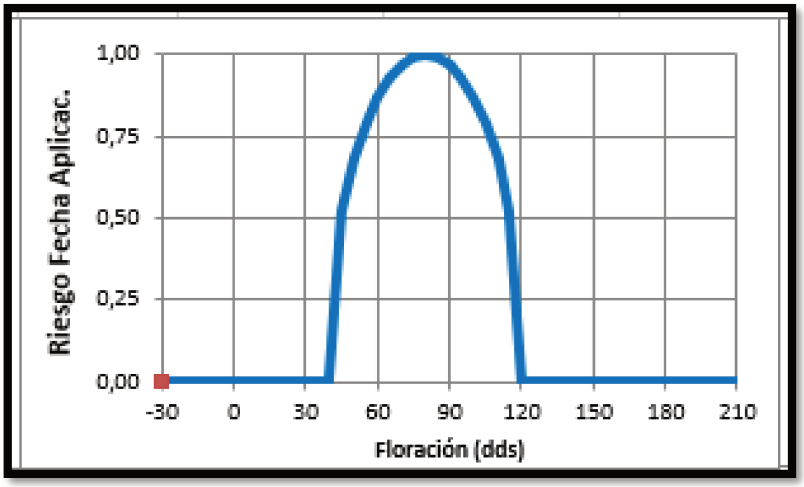


Gráfico 11. Indicador: Floración de la vegetación.

- **Kow / PV**: Según el momento de la aplicación sea previo o posterior al inicio de la floración, se le agrega hasta un 0,05 de impacto relativo a la amenaza del tratamiento (Gráfico 12).

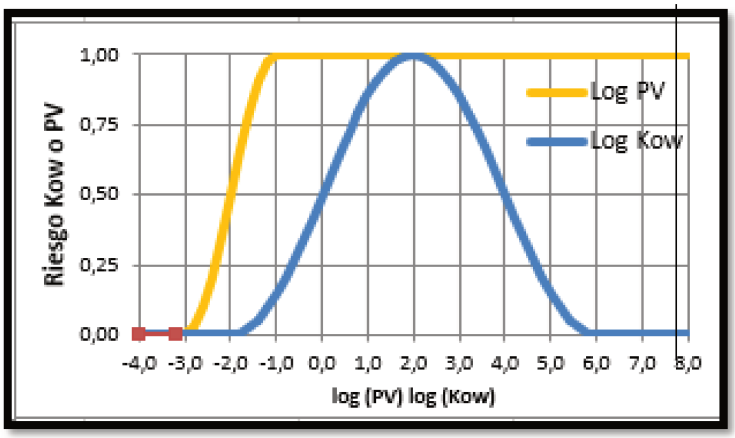


Gráfico 12. Indicador Kow o PV.

La sumatoria de los impactos relativos, de las tres variables consideradas desde el punto de vista de la vulnerabilidad (distancia, temperatura y floración), representa el 40% del riesgo de la aplicación. El 60% del riesgo está representado por la amenaza: U Tox (relación entre el peligro por toxicidad específica y la dosis aplicada) y el posible efecto del Kow o de la PV según la fecha de aplicación sea previa o posterior al inicio de la floración.

f.4) Correlación entre los indicadores de amenaza

Para poder integrar dentro del índice a las variables relacionadas con la amenaza, primero se verificó que no haya correlaciones entre ellas cuantificando la correlación entre los datos correspondientes a 446 principios activos que poseen los tres valores y que están almacenados en la hoja PPDB (base de datos de las propiedades de los plaguicidas) (Gráficos 13, 14 y 15).

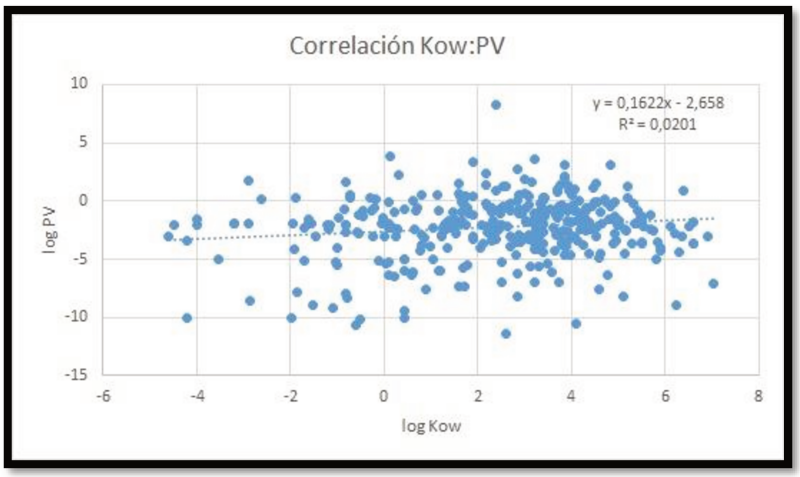


Gráfico 13: Correlación entre los indicadores Kow y PV.

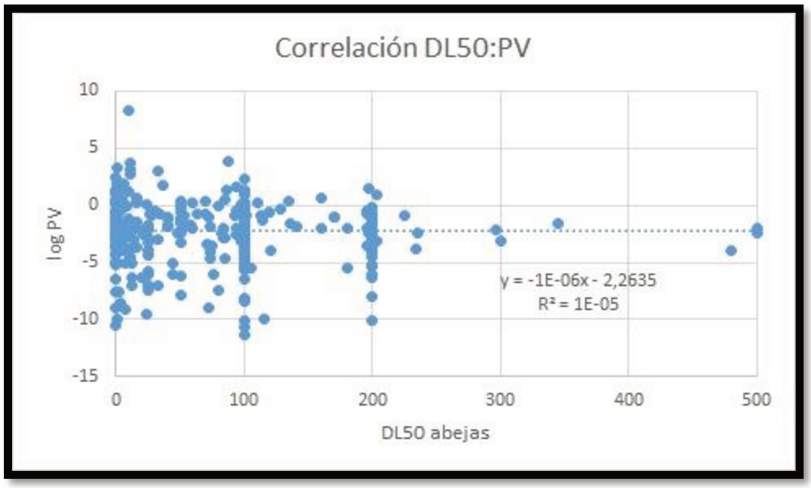


Gráfico 14: Correlación entre los indicadores DL50 y PV.

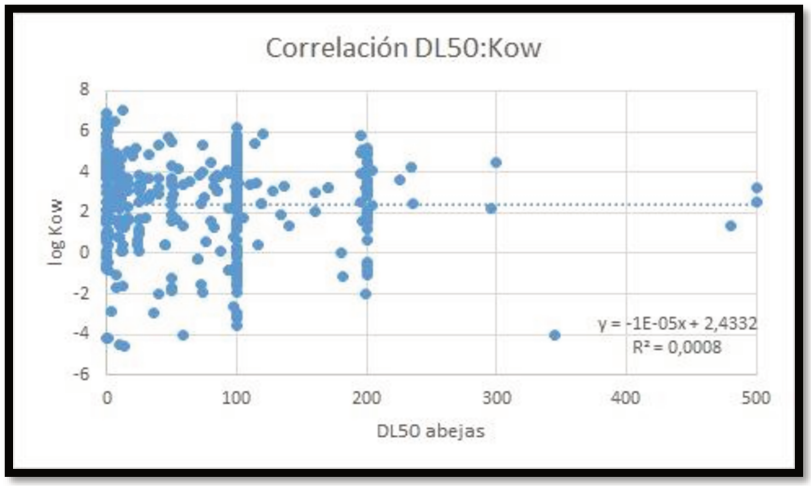


Gráfico 15: Correlación entre los indicadores DL50 y Kow.

Considerando que las U Tox, toman en cuenta la DL50 para abejas y la dosis y, por lo tanto, sintetizan la variabilidad de ambos indicadores y permiten incorporar cualquier decisión de cambio de la dosis según las circunstancias de manejo, es importante tener en cuenta que tampoco hay correlación entre estas dos variables para los 105 principios activos incluidos en el proceso de sensibilización del índice (Gráfico 16).

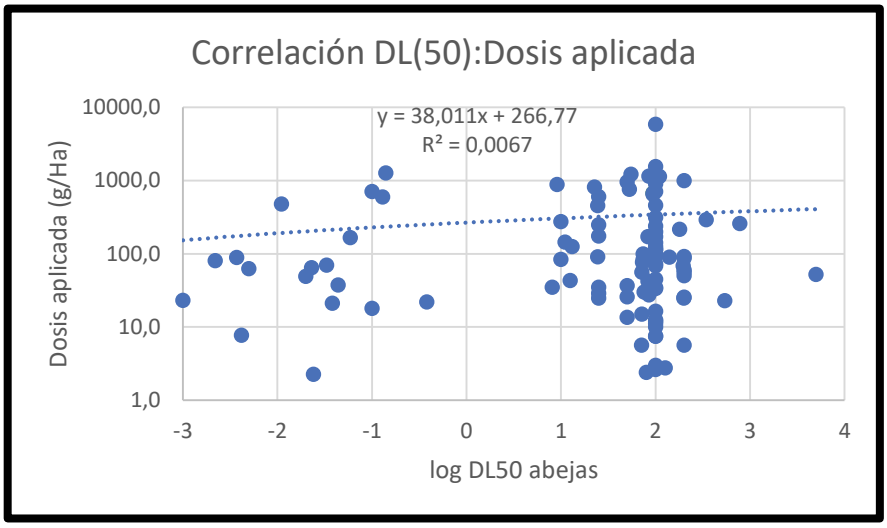


Gráfico 16: Correlación entre la DL50 y las dosis para los 105 principios activos utilizados en la sensibilización del índice propuesto.

En todos los casos la pendiente de la ecuación tiende a cero y el R^2 es muy bajo: indicadores de que no existe correlación entre las variables seleccionadas y, por lo tanto, se pueden utilizar en el proceso de lógica difusa. Al no haber correlación entre ellas, las variables al utilizarse en el mismo motor de lógica difusa no "duplican" efectos, no sesgan el resultado. Además, esta última baja correlación justifica el uso de la variable UTox.

f.5) Planillas de cálculo para el ApiTox

El libro de cálculo codificado en MS-Excel desarrollado para el ApiTox forma parte del sistema de información IIRAmb (Índices Integrados de Riesgo Ambiental); (Grenón et al., 2015). Consta de 5 hojas:

- **PPDB**: Base de datos de propiedades de los principios activos.
- **Consulta**: Búsqueda de los cultivos y sus tratamientos fitosanitarios realizados en un sitio en particular.
- **ApiTox Lote**: Sintetiza los riesgos para cada uno de los tratamientos fitosanitarios realizados en un cultivo, como la integración de todos estos riesgos considerando la totalidad del ciclo de manejo del cultivo (incluyendo el período de barbecho).
- **ApiT**: Permite consultar los riesgos parciales de cada uno de los principios activos utilizados durante el cultivo.
- **Sensibil**: Hoja complementaria donde se analizan simultáneamente 105 principios activos para los cuales se cuentan con registros de dosis utilizadas.

Hoja Sensibil

La hoja Sensibil se utilizó para calibrar los pesos relativos de cada variable y los umbrales para definir los rangos Favorables y Desfavorables. Se puede utilizar para investigar la distribución de los riesgos para situaciones específicas y analizar manejos alternativos.

Posee un gráfico de probabilidad acumulada de los valores de ApiTox, para los 105 principios activos considerados (ver Figura 9):

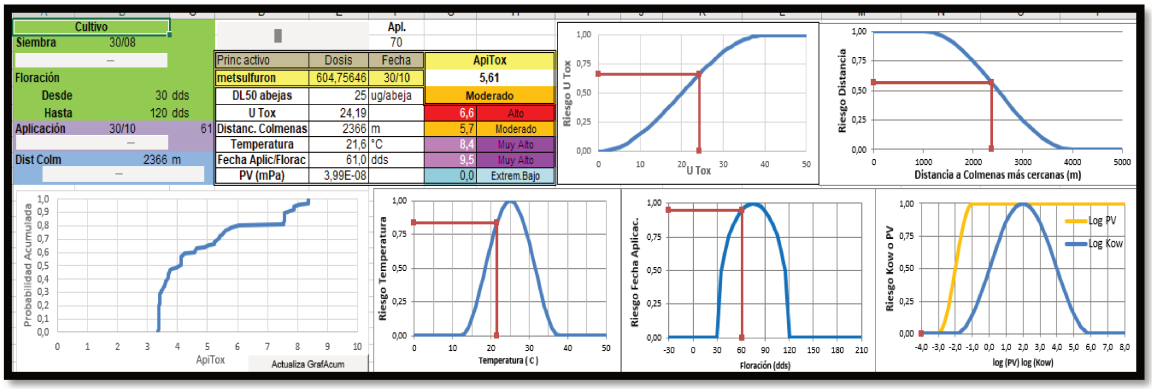
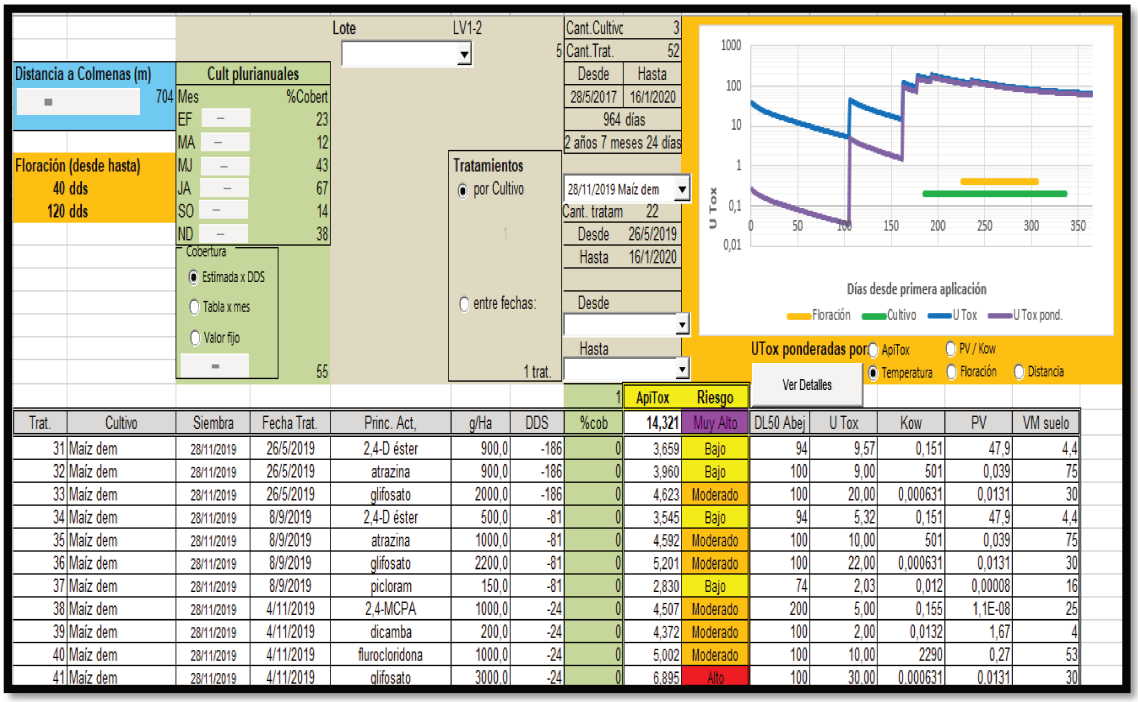


Figura 9: Hoja de sensibilización.

Hoja ApiTox Lote

Presenta un resumen de los riesgos de cada uno de los tratamientos realizados durante un cultivo, integra esos riesgos parciales en un índice global para todo el ciclo del cultivo y presenta un gráfico con la evolución de la U Tox, durante todo el período analizado. Estas U Tox se pueden ponderar según diversos criterios asociados con las variables relacionadas con la amenaza de los plaguicidas utilizados y de las circunstancias que modifican la vulnerabilidad de las abejas en el sitio (Figura 10).



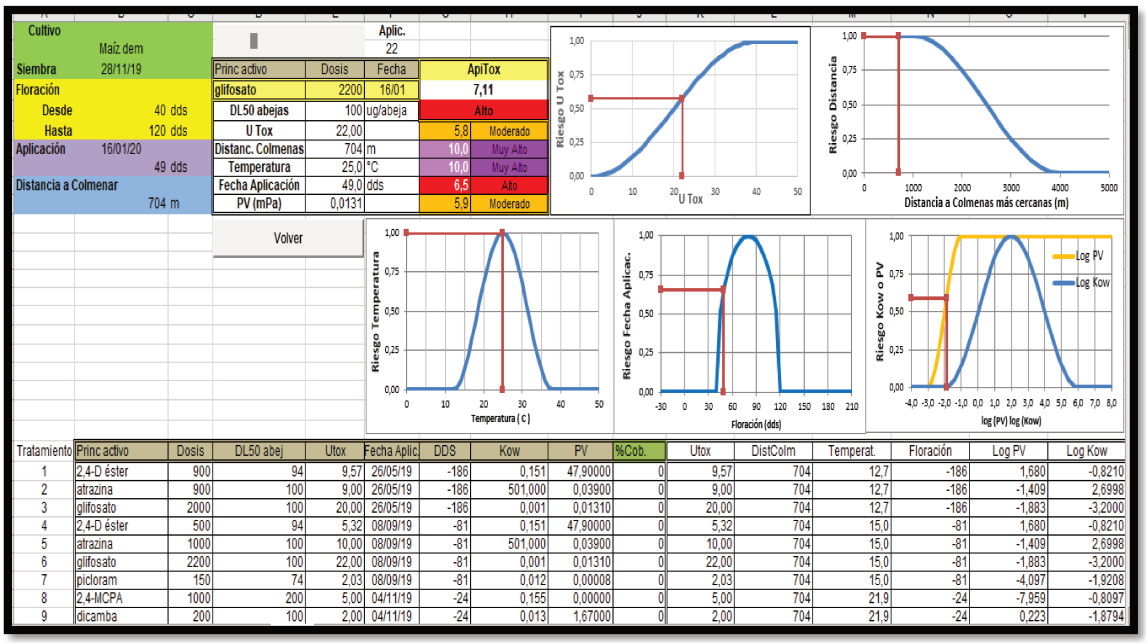
Trat.	Cultivo	Siembra	Fecha Trat.	Princ. Act.	g/Ha	DDS	%cob	ApiTox	Riesgo	DL50 Abej	U Tox	Kow	PV	VM suelo
31	Maíz dem	28/11/2019	26/5/2019	2,4-D éster	900,0	-186	0	3,659	Bajo	94	9,57	0,151	47,9	4,4
32	Maíz dem	28/11/2019	26/5/2019	atrazina	900,0	-186	0	3,960	Bajo	100	9,00	501	0,039	75
33	Maíz dem	28/11/2019	26/5/2019	glifosato	2000,0	-186	0	4,623	Moderado	100	20,00	0,000631	0,0131	30
34	Maíz dem	28/11/2019	8/9/2019	2,4-D éster	500,0	-81	0	3,545	Bajo	94	5,32	0,151	47,9	4,4
35	Maíz dem	28/11/2019	8/9/2019	atrazina	1000,0	-81	0	4,592	Moderado	100	10,00	501	0,039	75
36	Maíz dem	28/11/2019	8/9/2019	glifosato	2200,0	-81	0	5,201	Moderado	100	22,00	0,000631	0,0131	30
37	Maíz dem	28/11/2019	8/9/2019	picloram	150,0	-81	0	2,830	Bajo	74	2,03	0,012	0,00008	16
38	Maíz dem	28/11/2019	4/11/2019	2,4-MCPA	1000,0	-24	0	4,507	Moderado	200	5,00	0,155	1,1E-08	25
39	Maíz dem	28/11/2019	4/11/2019	dicamba	200,0	-24	0	4,372	Moderado	100	2,00	0,0132	1,67	4
40	Maíz dem	28/11/2019	4/11/2019	flurocloridona	1000,0	-24	0	5,002	Moderado	100	10,00	2290	0,27	53
41	Maíz dem	28/11/2019	4/11/2019	glifosato	3000,0	-24	0	6,895	Alto	100	30,00	0,000631	0,0131	30

Figura 10: Hoja ApiTox Lote.

El botón “Ver Detalles” dirige al usuario hacia la Hoja ApiT.

Hoja ApiT

En esta hoja se pueden visualizar los detalles de cada uno de los principios activos, su manejo y las condiciones ambientales que definen el riesgo para las abejas (Figura 11).



Tratamiento	Princ activo	Dosis	DL50 abej	Utox	Fecha Aplic	DDS	Kow	PV	%Cob.	Utox	DistColm	Temperat.	Floración	Log PV	Log Kow
1	2,4-D éster	900	94	9,57	26/05/19	-186	0,151	47,90000	0	9,57	704	12,7	-186	1,680	-0,8210
2	atrazina	900	100	9,00	26/05/19	-186	501,000	0,03900	0	9,00	704	12,7	-186	-1,409	2,6998
3	glifosato	2000	100	20,00	26/05/19	-186	0,001	0,01310	0	20,00	704	12,7	-186	-1,883	-3,2000
4	2,4-D éster	500	94	5,32	08/09/19	-81	0,151	47,90000	0	5,32	704	15,0	-81	1,680	-0,8210
5	atrazina	1000	100	10,00	08/09/19	-81	501,000	0,03900	0	10,00	704	15,0	-81	-1,409	2,6998
6	glifosato	2200	100	22,00	08/09/19	-81	0,001	0,01310	0	22,00	704	15,0	-81	-1,883	-3,2000
7	picloram	150	74	2,03	08/09/19	-81	0,012	0,00008	0	2,03	704	15,0	-81	-4,097	-1,9208
8	2,4-MCPA	1000	200	5,00	04/11/19	-24	0,155	0,00000	0	5,00	704	21,9	-24	-7,959	-0,8097
9	dicamba	200	100	2,00	04/11/19	-24	0,013	1,67000	0	2,00	704	21,9	-24	0,223	-1,8794

Figura 11: Hoja ApiT.

g) Discusión

En la evaluación del riesgo por plaguicidas para las abejas se deben considerar dos situaciones: el tóxico puede llegar hasta las abejas y/o las abejas pueden dirigirse hacia el sitio de aplicación de los plaguicidas.

En ambos casos es determinante el peligro que representa el principio activo utilizado, representado por la DL50, y la amenaza que representa la dosis empleada en el tratamiento fitosanitario.

Para la primera situación es importante considerar las posibilidades de que el plaguicida pueda llegar hasta las colmenas por deriva, sin importar la época del año. La distancia a la colmena cuantifica este riesgo considerando como 1000 m la distancia límite para definirla como totalmente desfavorable.

En cambio, para la segunda situación, la distancia máxima se define en 4000 m que, según algunas publicaciones, es el máximo vuelo que suelen realizar las abejas para el pecoreo. Pero para esta

situación también se deben considerar las condiciones adecuadas para que el vuelo pueda llevarse a cabo: es importante la época del año.

La fecha de aplicación del plaguicida define la temperatura media probable para la época y el momento fenológico del cultivo bajo tratamiento (en floración o no). Entonces si además de la distancia menor a 4000 m se tienen temperaturas que permitan la actividad fuera de la colmena y coincide con la época de floración en el sitio bajo tratamiento, tendremos la combinación adecuada para considerar muy alta probabilidad de presencia de abejas en él, pudiéndose así considerar muy alto riesgo de impacto.

En la tabla 3, se detallan los valores finales establecidos para el índice Apitox.

Rango del ApiTox	Riesgo de Toxicidad Crónica
$0 \leq$ ApiTox < 1	Extremadamente Bajo
$1 \leq$ ApiTox < 2	Muy Bajo
$2 \leq$ ApiTox < 4	Bajo
$4 \leq$ ApiTox < 6	Moderado
$6 \leq$ ApiTox < 8	Alto
$8 \leq$ ApiTox ≤ 10	Muy Alto

Tabla 3: Definición de rangos y valores de riesgo del índice ApiTox.

El ApiTox puede variar el riesgo de un tratamiento, no solo por las condiciones de peligro o amenaza, sino también por las condiciones de vulnerabilidad, básicamente el riesgo por exposición que resulta de la combinación de distancia de la colmena al sitio, condiciones ambientales (temperatura y viento) para el vuelo y fuente de alimento para las abejas (floración).

En las Figuras 12 y 13, se observa 2 situaciones distintas, con el mismo principio activo.

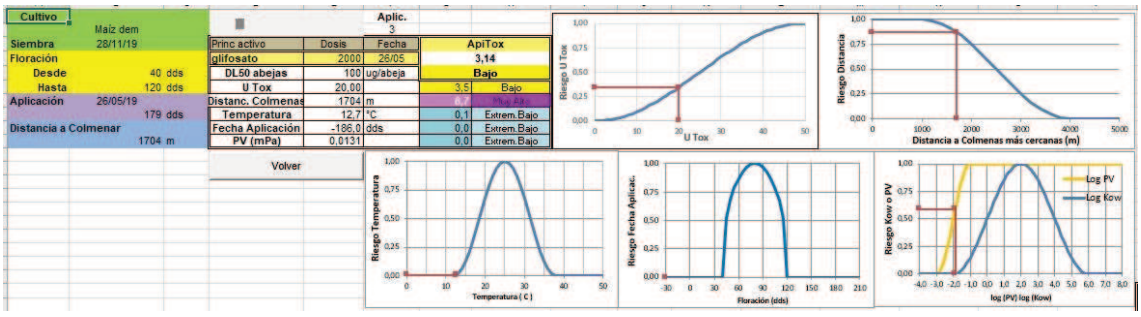


Figura 12: Riesgo por aplicación de glifosato en mayo: Bajo (3,14), sin condiciones adecuadas de temperatura ni floración para atraer las abejas, aún cuando la distancia a la colmena es poca.

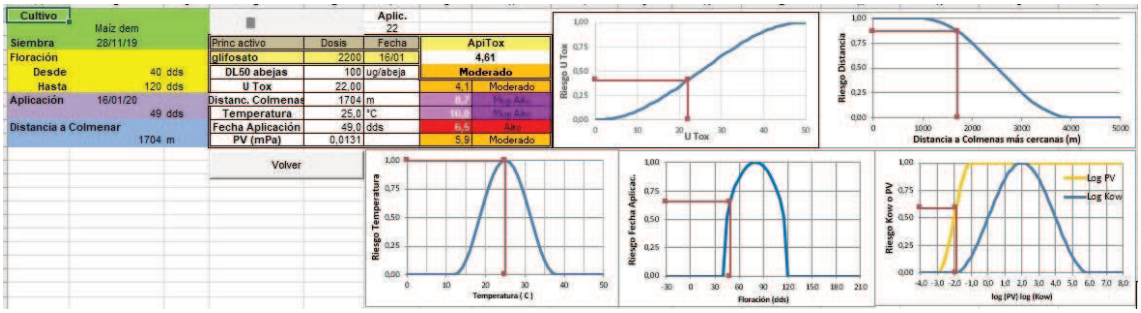


Figura 13: Riesgo por aplicación de glifosato en el mismo sitio y cultivo, pero en enero: Moderado (4,61), se incrementa por causa de la mayor vulnerabilidad calculada a partir de la temperatura del aire y la floración del cultivo.

4. CONCLUSIONES

- Las abejas pueden estar expuestas a los fitosanitarios por contacto durante la aplicación cuando el plaguicida se deposita sobre la superficie corporal de la abeja, y al caminar por superficies que contengan restos de los fitosanitarios aplicados; además, puede incorporar plaguicidas por ingestión al consumir o manipular néctar, polen, resinas o agua que contengan residuos de estos compuestos.
- Si bien todos los fitosanitarios pueden ocasionar daño en las abejas, los insecticidas presentan mayor riesgo potencial de causar eventos toxicológicos en *A. mellifera*.
- Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los fitosanitarios determinan el tipo de impacto que pueden ocasionar en los organismos no blancos expuestos. Sin embargo, las características de *A. mellifera* (biología, comportamiento, dinámica poblacional principalmente) y del lote agrícola sobre el cual se realizan las aplicaciones (ubicación del lote y de las colmenas más cercanas, cultivos implantados y condiciones ambientales durante la aplicación), permiten evaluar el riesgo de las aplicaciones de fitosanitarios sobre las abejas con mayor precisión.
- Ante la complejidad planteada por la problemática de la aplicación de agroquímicos en ambientes rurales cercanos a apiarios, y, a partir de la información obtenida en este trabajo, se desarrolló un índice de elaboración propia denominado **"Apitox".**

- Este índice, posibilita la evaluación *ex ante* del riesgo de los tratamientos fitosanitarios sobre *A. mellifera*, para cultivos extensivos y su agregación a nivel de cada cultivo. Es una herramienta muy útil para predecir y anticipar el impacto de las aplicaciones sobre la población de abejas, brindando información relevante a los productores apícolas, agrícolas y asesores, donde es fundamental para su buen uso, la comunicación continua entre ellos, y así poder disminuir los riesgos dado que tanto el plaguicida puede llegar a las colmenas cercanas (a menos de 1000 m) como las abejas de colmenas lejanas pueden desplazarse hacia el sitio bajo tratamiento (hasta unos 4000 m).
- La presente es una primera aproximación a la estimación del riesgo: tanto los criterios para cuantificar el riesgo (DL50, dosis, distancia, temperatura, floración y PV/Kow) como los umbrales para considerar las circunstancias como favorables o desfavorables pueden modificarse o ajustarse en base a nuevas aproximaciones o a nuevos modelos conceptuales de la interacción abejas-plaguicidas. Además, esta versión solo está considerando la toxicidad aguda y no ha incluido la evaluación de posibles efectos crónicos (algo de ello se esboza en la planilla 2 ApiTox Lote cuando se presenta la evolución de UTox a lo largo del cultivo).

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abou-Shaara, H. F. (2014). The foraging behaviour of honey bees, Apis mellifera: a review. *Veterinarni medicina*, *59*(1). DOI:10.17221/7240-VETMED
- Arregui, M. C., Sánchez, D., Althaus, R., Scotta, R. R., & Bertolaccini, I. 2010. Assessing the risk of pesticide environmental impact in several Argentinian cropping systems with a fuzzy expert indicator. Pest Management science, 66(7), 736-740. 10.1002/ps.1935
- Arregui, M. C; Puricelli, E. C. 2016. *Mecanismo acción de plaguicidas*. 3° Ed. Universidad Nacional de Rosario. 265 pp.
- Assaghir, Z., Girardin, P., & Napoli, A. 2009, July. Fuzzy Logic Approach to Represent and Propagate Imprecision in Agri-Environmental Indicator Assessment. In Proceedings of the Joint

2009 International Fuzzy Systems Association World Congress and 2009 European Society of Fuzzy Logic and Technology Conference (pp. 707-712).

- CASAFE. 2024. Guía Online de Productos Fitosanitarios (Acceso: Septiembre de 2024).

- Carvajal, V. L. 2020. Importancia de las abejas como polinizadores. Departamento de Biología. Escuela Politécnca Nacional. Disponible en: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21021 (Acceso: Octubre 2024).

- Chmiel, J. A., Daisley, B. A., Pitek, A. P., Thompson, G. J., & Reid, G. (2020). Understanding the effects of sublethal pesticide exposure on honey bees: a role for probiotics as mediators of environmental stress. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 22. https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00022

- Crall, J. D., Switzer, C. M., Oppenheimer, R. L., Ford Versypt, A. N., Dey, B., Brown, A., Eyster, M., Guérin, C., Pierce, N. E., Combes, S. A., & de Bivort, B. L. (2018). Neonicotinoid exposure disrupts bumblebee nest behavior, social networks, and thermoregulation. Science, 362(6415), 683-686. DOI: 10.1126/science.aat159

- Devillers, J., & Pham-Delègue, M. H. (Eds.). 2002. Honey bees: estimating the environmental impact of chemicals. CRC Press. 352 pp. https://doi.org/10.1201/9780203218655

- Devillers, J., Decourtye, A., Budzinski, H., Pham-Delègue, M. H., Cluzeau, S., & Maurin, G. (2003). Comparative toxicity and hazards of pesticides to Apis and non-Apis bees. A chemometrical study. SAR and QSAR in Environmental Research, 14(5-6), 389-403. https://doi.org/10.1080/10629360310001623980

- Di Pasquale, G., Alaux, C., Le Conte, Y., Odoux, J. F., Pioz, M., Vaissière, B. E., Belzunces, L. P., & Decourtye, A. (2016). Variations in the availability of pollen resources affect honey bee health. PloS one, 11(9), e0162818. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162818

- Galán, E; Grenón, D. (2016). Fitosanitarios en zonas periurbanas y escuelas Rurales: Herramientas para evaluar su riesgo. Tesina de grado, Facultad de Ciencias Agrarias, UNL, Esperanza, Sta. Fe. 62 pp.

- Ferraro, D. O., Ghersa, C. M., & Sznaider, G. A. 2003. Evaluation of environmental impact indicators using fuzzy logic to assess the mixed cropping systems of the Inland Pampa, Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 96(1-3), 1-18. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00017-3

- Ferraro, D. O., & de Paula, R. 2022. A fuzzy knowledge-based model for assessing risk of pesticides into the air in cropping systems. *Science of the Total Environment*, 820, 153158. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153158

- Fischer, T., & Moriarty, T. 2014. Pesticide risk assessment for pollinators. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). Wiley Blackwell. https://doi.org/10.1002/9781118852408.fmatter

- García Leyton, L. A. (2004). Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales. Universitat Politècnica de Catalunya. https://dx.doi.org/10.5821/dissertation-2117-94140

- Gray, A., Adjlane, N., Arab, A., Ballis, A., Brusbardis, V., Charrière, J. D., ... & Brodschneider, R. (2020). Honey bee colony winter loss rates for 35 countries participating in the COLOSS survey for winter 2018–2019, and the effects of a new queen on the risk of colony winter loss. *Journal of Apicultural Research*, 59(5), 744-751. https://doi.org/10.1080/00218839.2022.2113329

- Grenón, D., Arregui, M.C., Galán E; Sánchez, D.E. 2015. IIRAmb versión 0.5: Integración de índices de riesgo ambiental para diseñar estrategias de manejo fitosanitario de menor impacto. XV Jornadas Fitosanitarias Argentinas, Santa Fe. Argentina.

- Gunawan, A. P., & Utama, D. N. 2024. Decision support model to assess pesticide safeness toward environment. Environmental Analysis, Health and Toxicology, 39, e2024003. 10.5620/eaht.2024003

- Herbert, L. T., Arenas, A., & Farina, W. M. 2011. Trazas de glifosato afectan el aprendizaje asociativo en abejas. Buenos Aires. Libro de resúmenes. 42° Congreso Internacional de Apicultura – APIMONDIA. 21 AL 25 DE SEPTIEMBRE DE 2011. Buenos Aires. Argentina.

- Katzenelson, M. 1965. Iniciación apícola. Ed. Instituto salesiano de artes gráficas. Buenos Aires. 95 pp.

- Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. Proceedings of the royal society B: biological sciences, 274(1608), 303-313. https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721

- Krupke, C. H., Hunt, G. J., Eitzer, B. D., Andino, G., & Given, K. 2012. Multiple routes of pesticide exposure for honey bees living near agricultural fields. *PLoS one*, 7(1), e29268. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029268

- Kulhanek, K., Steinhauer, N., Rennich, K., Caron, D. M., Sagili, R. R., Pettis, J. S., Ellis, J. D., Wilson,, M. E., Wilkes, J. T., Tarpy, D. R., Rose, R., Lee, K., Rangel, J., & vanEngelsdorp, D. (2017). A national survey of managed honey bee 2015–2016 annual colony losses in the USA. Journal of apicultural research, 56(4), 328-340. https://doi.org/10.1080/00218839.2017.1344496

- LANCIS (2023). Lógica difusa. Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad. UNAM, México. http://www.apc.lancis.ecologia.unam.mx/modulos/impacto/docs/build/html/fuzzy.html

- Nazzi, F., & Pennacchio, F. (2014). Disentangling multiple interactions in the hive ecosystem. Trends in parasitology, 30(12), 556-561.

- Okwu, M.O., Nwachukwu, A.N. (2019). A review of fuzzy logic applications in petroleum exploration, production and distribution operations. J Petrol Explor Prod Technol9, 1555–1568. https://doi.org/10.1007/s13202-018-0560-2

- Pascale, A.J., & Damario, E.A. 2004. Bioclimatologia agrícola y agroclimatologia. Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomia. 550 pp.

- Persano, A. L. (1996). *Apicultura práctica*. Ed. Hemisferio Sur. 297 pp.

- Roser, M; Rosado, P. (2019). "Pesticides". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: 'https: //ourworldindata.org/pesticides'.

- Requier, F., Antúnez, K., Morales, C. L., Aldea Sánchez, P., Castilhos, D., Garrido, P. M., Giacobino, A., Reynaldi, F., Rosso Londoño, J. M., Santos, E., & Garibaldi, L. A. (2018). Trends in beekeeping and honey bee colony losses in Latin America. Journal of Apicultural Research, 57(5), 657-662. https://doi.org/10.1080/00218839.2018.1494919

- Roussel, O., Cavelier, A., & van der Werf, H. M. 2000. Adaptation and use of a fuzzy expert system to assess the environmental effect of pesticides applied to field crops. *Agriculture, ecosystems & environment, 8*0(1-2), 143-158. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00142-0

- Southwick, E. E., & Southwick Jr, L. (1992). Estimating the economic value of honey bees (Hymenoptera: Apidae) as agricultural pollinators in the United States. Journal of economic entomology, 85(3), 621-633. https://doi.org/10.1093/jee/85.3.621

- Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). 2021.

- Takagi, T., & Sugeno, M. 1985. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, (1), 116-132. https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399

- Tong, L., Nieh, J. C., & Tosi, S. (2019). Combined nutritional stress and a new systemic pesticide (flupyradifurone, Sivanto®) reduce bee survival, food consumption, flight success, and thermoregulation. Chemosphere, 237, 124408. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124408

- Tosi, S., Nieh, J. C., Sgolastra, F., Cabbri, R., & Medrzycki, P. (2017). Neonicotinoid pesticides and nutritional stress synergistically reduce survival in honey bees. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 284(1869), 20171711. https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1711

- Tosi, S., & Nieh, J. C. (2019). Lethal and sublethal synergistic effects of a new systemic pesticide, flupyradifurone (Sivanto®), on honeybees. Proceedings of the Royal Society B, 286(1900), 20190433. https://doi.org/10.1098/rspb.2019.0433

- Tosi, S., Sfeir, C., Carnesecchi, E., & Chauzat, M. P. (2022). Lethal, sublethal, and combined effects of pesticides on bees: A meta-analysis and new risk assessment tools. Science of the Total Environment, 844, 156857. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156857

- Vallejos, G. F. (2023). Estudio exploratorio del riesgo por plaguicidas sobre las poblaciones de Abejas (Apis mellifera). Tesis de especialización, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Católica de Córdoba. http://pa.bibdigital.ucc.edu.ar/4822/.

- Van Der Werf, H. M., & Zimmer, C. 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere*, 36(10), 2225-2249.

- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets, Information and Control, Volume 8, Issue 3: 338-353, ISSN 0019-9958, https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X.