

Libros de **Cátedra**

# Aplicación de modelos para la gestión y diagnóstico de problemáticas ambientales

Laura A. Massolo y Germán H. Castagnasso (autores)

FACULTAD DE  
CIENCIAS EXACTAS

**e**  
exactas



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE LA PLATA

# **APLICACIÓN DE MODELOS PARA LA GESTIÓN Y DIAGNÓSTICO DE PROBLEMÁTICAS AMBIENTALES**

Laura A. Massolo y Germán H. Castagnasso  
Autores

Facultad de Ciencias Exactas



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE LA PLATA



# Índice

## Capítulo 1

Conceptos generales aplicados a modelos ambientales \_\_\_\_\_ 4

## Capítulo 2

Aplicación de QWASI y BASL4 Multimediales \_\_\_\_\_ 12

## Capítulo 3

Procesamiento de registros meteorológicos para el modelado  
y la gestión ambiental \_\_\_\_\_ 61

## Capítulo 4

Aplicación de modelos de dispersión de contaminantes en aire \_\_\_\_\_ 92

Los autores \_\_\_\_\_ 119

# CAPÍTULO 1

## Conceptos generales aplicados a modelos ambientales

**Resumen:** En este capítulo se desarrollará una introducción a las distintas aplicaciones de los modelos ambientales haciendo hincapié en su relevancia en el estudio de impactos ambientales y análisis de riesgo en nuestro país y la región. Se abordará el tema desde una perspectiva integral teniendo en cuenta modelos de aplicación para evaluar la distribución en distintos compartimentos ambientales como así también modelos específicos para determinados compartimentos.

### Introducción

Actualmente, distintos problemas de índole ambiental son reconocidos como una prioridad tanto a escala global (cambio climático) como a escala local, como puede ser la contaminación de un cuerpo de agua. En ambos casos, se requieren acciones para garantizar que el ambiente como un todo siga siendo habitable. Dichas acciones requieren de una apropiada interpretación, seguimiento y predicción, siendo el modelado ambiental una herramienta fundamental para lograrlo.

Cada vez más se necesitan modelos que proporcionen una interpretación de la dispersión, distribución y destino de los compuestos químicos en el ambiente, que permitan guiar los esfuerzos de los profesionales en el estudio, la regulación y la remediación ambiental (Aral Mustafá, 2010).

El éxito de las estrategias aplicadas dependerá en gran medida de las preguntas específicas que los profesionales se formulen sobre el destino ambiental de los compuestos a evaluar. Es cada vez más evidente la importancia de preservar el equilibrio y la funcionalidad de los ecosistemas naturales, no solo por su valor intrínseco, sino también por su capacidad para servir como indicadores tempranos de posibles impactos en la salud humana. Al proteger la integridad de los ecosistemas, podemos aprovechar su capacidad para detectar y señalar problemas de salud pública antes de que se conviertan en crisis graves. Por lo tanto, garantizar la salud de los ecosistemas no solo es una cuestión de conservación ambiental, sino también una medida preventiva para salvaguardar la salud y el bienestar de las personas.

El conocimiento de los modelos de dispersión y distribución de contaminantes y la práctica en casos reales permiten aplicarlos en herramientas de gestión y diagnóstico ambiental, tanto

preventivas como de control y mitigación. Entre las mismas se pueden mencionar la evaluación de impacto ambiental, el desarrollo de líneas de base, el análisis de riesgo, el ordenamiento ambiental territorial y el control del cumplimiento de la legislación vigente. Estos conocimientos permiten la inserción en grupos interdisciplinarios de trabajo. Cabe mencionar que, debido a su utilidad, algunos modelos están desarrollados en la legislación en nuestro país, como, por ejemplo, en la Provincia de Buenos Aires, y de esta manera se transforman en aplicaciones obligatorias en el análisis de impacto y riesgos ambientales (Massolo, 2015, Massolo, 2022).

En este libro se propone el abordaje de aplicaciones de los mencionados modelos para casos concretos de diagnóstico, prevención, control y mitigación. Evaluaremos aplicaciones de modelos multimediales como así también de modelos específicos asociados a la dispersión atmosférica y el destino final de los contaminantes.

## **Aplicaciones de los modelos multimediales**

En el estudio del destino ambiental de los compuestos químicos, se recurre a una variedad de modelos multimediales para comprender su distribución y dispersión en diferentes medios ambientales. Desde la aplicación de agroquímicos en el suelo hasta la interacción entre aire y agua, así como la relevancia del intercambio entre sedimentos y agua, estos modelos representan una herramienta muy utilizada tanto por investigadores como así también profesionales ambientales.

Los modelos presentados abordan la complejidad de los procesos de transporte y transformación de los contaminantes. Desde modelos simples que consideran el intercambio aire-suelo hasta modelos más elaborados que incluyen el intercambio aire-agua y sedimento-agua, se analiza una amplia gama de escenarios ambientales.

Un aspecto fundamental es la consideración de la persistencia de los compuestos químicos, vital para la selección de agroquímicos y la evaluación de medidas correctivas en caso de contaminación. Los modelos también abordan procesos como la deposición, re-suspensión y entierro de sedimentos, así como la transferencia difusiva de agua entre la columna de agua y el sedimento.

Más adelante se aborda en detalle los cálculos necesarios para estimar el equilibrio de masa en estado estacionario, proporcionando una comprensión profunda de la distribución de los contaminantes en las diferentes fases del ambiente. Además, se destaca la disponibilidad de modelos de hojas de cálculo que facilitan la aplicación práctica de estos conceptos, permitiendo evaluaciones detalladas del destino ambiental de los compuestos químicos.

Este nivel de complejidad se determina por factores como el tipo de interacción que regula el intercambio (equilibrio, estado estacionario o estado no estacionario) y si el sistema se considera abierto o cerrado. Esta perspectiva permite una comprensión más profunda de la dinámica ambiental y facilita el desarrollo de modelos que reflejen con precisión la realidad ambiental en sus diferentes aspectos y escalas.

El modelo más básico de balance de masa se representa mediante una "caja" de un solo compartimento que recibe diversas entradas. A partir de estas entradas, se calculan los diferentes valores que representan los procesos de producción o pérdida dentro del sistema. Posteriormente, se determina la fugacidad en estado estacionario, lo que nos permite deducir el punto en el cual las entradas y las salidas se equilibran. Además, se puede aplicar una versión del modelo en estado no estacionario para abordar situaciones dinámicas. Algunos ejemplos prácticos de esta metodología incluyen el análisis de una "caja" de suelo tratada con lodo o pesticidas, la evaluación del contenido de sustancias químicas en los peces a partir del agua que respiran y los alimentos que ingieren, así como el estudio del balance de masa del agua en un lago. Este enfoque proporciona una herramienta valiosa para comprender y predecir los flujos y acumulaciones de sustancias químicas en diferentes sistemas ambientales. Conceptos desarrollados en el libro de cátedra Modelos de dispersión y distribución de contaminantes en el ambiente (Massolo L, 2022).

La complejidad de los modelos puede aumentarse mediante la inclusión de más compartimentos interconectados. Un ejemplo de esto es el modelo cuantitativo de interacción entre agua, aire y sedimentos (QWASI), que involucra balances de masa en dos compartimentos (agua y sedimento), con la concentración definida en el aire.

En contextos como ríos, puertos o estuarios, estos pueden ser tratados como una serie de cajas eulerianas conectadas o mediante coordenadas lagrangianas, que siguen una parcela de agua a medida que fluye. Para sistemas de ingeniería como plantas de tratamiento de aguas residuales, se ha desarrollado un modelo en el que los compartimentos son los principales componentes del proceso de lodos activados. Esto demuestra que los conceptos de modelado pueden aplicarse efectivamente a sistemas de ingeniería, los cuales suelen ser más simples de modelar que los sistemas naturales debido a su clara definición en términos de volúmenes, flujos y condiciones operativas.

Otro ejemplo relevante es el modelo TaPL3, una herramienta de evaluación sofisticada y especializada que se utiliza para analizar productos químicos que presentan alta persistencia y tienen el potencial de ser transportados a largas distancias a través de medios móviles como el aire o el agua. Este modelo, clasificado como Nivel III, representa un enfoque avanzado en la evaluación de riesgos ambientales y la gestión de productos químicos, ofreciendo una perspectiva detallada y precisa sobre cómo estos compuestos pueden dispersarse y afectar diferentes ecosistemas a nivel regional o incluso global. Su uso es básico a la hora de toma de

decisiones en materia de regulación y control de sustancias químicas, así como para diseñar estrategias efectivas de mitigación de riesgos ambientales.

Los enfoques multicompartimentales también se aplican al destino químico en organismos, desde plantas hasta humanos y animales. Entre ellos podemos mencionar el modelo TMF capaz de predecir los factores de aumento tróficos en las redes alimenticias acuáticas para hasta 7 especies distintas. Para lograr esto, se dividen en tres modelos, cada uno representando un tipo específico de red alimenticia. En primer lugar, está el modelo para la red alimenticia pelágica, que se enfoca en las interacciones alimenticias en la columna de agua, donde las especies se alimentan directamente de organismos acuáticos en movimiento. Luego, se encuentra el modelo para la red alimenticia de detritus, que se centra en las relaciones de alimentación que involucran organismos descomponedores y materia orgánica en degradación en el fondo del cuerpo de agua. Finalmente, se presenta un modelo combinado que integra tanto la red alimenticia pelágica como la de detritus, capturando así las complejas interacciones entre los diferentes niveles tróficos en ambos hábitats acuáticos. Cada uno de estos modelos se presenta en hojas separadas, lo que facilita su comprensión y aplicación individualizada según el tipo de red alimenticia que se esté estudiando (Trent, 2024).

Otro enfoque interesante son los conocidos como modelos farmacocinéticos de base fisiológica (PBPK) o toxicocinéticos pueden ser bastante complejos, como el modelo POPCYCLING-BALTIC, que modela el destino químico en la región del Báltico. El modelo farmacocinético puede ser acoplado al modelo *indoor*. El modelo *indoor* es una herramienta dinámica que se basa en la fugacidad para generar concentraciones de contaminantes en un ambiente interior específico, como podría ser una casa. Su utilidad radica en la capacidad para estimar las concentraciones de contaminantes que podrían experimentarse a lo largo del tiempo debido a la introducción de diversas sustancias químicas. Estas pueden ingresar al ambiente interior a través de diversas rutas, como la aplicación superficial de productos de limpieza, la presencia de químicos en el agua potable, la utilización de productos de consumo como disolventes, fragancias y pesticidas, así como la infiltración desde fuentes externas. Este modelo proporciona una representación dinámica y detallada de cómo estos contaminantes pueden acumularse y dispersarse en un espacio interior, lo que resulta invaluable para evaluar el riesgo potencial para la salud humana y diseñar estrategias efectivas de mitigación.

En el capítulo 2, nos adentramos en el mundo de los modelos multimediales con un enfoque en dos herramientas destacadas: el modelo multisegmento QWASI y el modelo BASL4. Estos modelos son fundamentales para comprender el destino de compuestos químicos en cuerpos de agua y suelos, respectivamente. Desde la evaluación del comportamiento de sustancias en estado estacionario hasta la estimación del destino de contaminantes orgánicos, exploraremos cómo estas herramientas pueden ser utilizadas para garantizar la seguridad ambiental en diversas aplicaciones, desde la gestión de efluentes hasta la protección de cultivos.

El modelo QWASI, que significa "Interacción cuantitativa de agua, aire y sedimento", ha sido desarrollado con el propósito específico de arrojar luz sobre el destino químico de diversas sustancias en entornos acuáticos, centrándose especialmente en lagos. Este modelo

proporciona una visión detallada del comportamiento en estado estable de compuestos químicos orgánicos en un lago, considerando múltiples fuentes de entrada y procesos de eliminación. En este contexto, el QWASI modela cómo los químicos ingresan al lago a través de descargas directas, flujos de entrada en los ríos circundantes y la deposición atmosférica. Una vez en el lago, estos compuestos se enfrentan a una serie de procesos de eliminación, que incluyen evaporación, reacciones irreversibles en el agua y los sedimentos, así como flujos de salida del agua y el enterramiento de sedimentos. Para capturar la complejidad de estos intercambios, las ecuaciones de balance de masa en el modelo QWASI consideran la columna de agua bien mezclada y la capa superficial de sedimento. Estas ecuaciones incluyen términos que describen la difusión de sustancias entre el agua y los sedimentos, la deposición de material en el fondo del lago y la resuspensión de sedimentos desde el lecho del lago.

El desarrollo de modelos de intercambio aire-agua y sedimento-agua ha sentado las bases para la creación de un modelo integral destinado a cuerpos de agua, como lagos y lagunas. Este modelo, conocido como QWASI o "Interacción Cuantitativa entre Agua, Aire y Sedimentos", combina elementos de reacción y advección para comprender el comportamiento químico en estos entornos acuáticos.

Este modelo, cuya primera versión fue publicada en 1983 por Mackay et al., ha sido aplicado en diversas investigaciones, desde la evaluación de PCBs en el lago Ontario hasta el estudio de productos químicos organoclorados en la industria de la pulpa y el papel. La versión actualizada del modelo, lanzada en 2014, está disponible en formato de hoja de cálculo en el sitio web de CEMC (Trent University), facilitando su aplicación práctica.

El QWASI permite al usuario definir tasas de emisión y entradas de advección al agua, calculando posteriormente fugacidades, concentraciones y flujos en agua y sedimentos. Las ecuaciones del modelo abordan procesos de transporte y transformación, como la deposición, resuspensión y entierro de sedimentos, proporcionando una comprensión detallada del destino de las sustancias químicas en el agua.

Al resolver las ecuaciones del modelo en estado estacionario, se pueden calcular concentraciones, cantidades y flujos, lo que permite visualizar qué procesos son más relevantes para el compuesto químico en cuestión. Este enfoque integral proporciona una herramienta para comprender y gestionar la contaminación en cuerpos de agua, contribuyendo así a la protección y conservación de estos importantes recursos naturales.

El modelo BASL4, que significa *Biosolid Modified Soil Level IV*, es una herramienta sofisticada diseñada para analizar el destino de sustancias químicas en el suelo, especialmente cuando se utilizan biosólidos como enmienda del suelo. Este modelo considera una variedad de procesos y factores que influyen en la distribución y el comportamiento de los químicos en el suelo a lo largo del tiempo. Cuando un químico se introduce en el suelo, ya sea directamente o en asociación con biosólidos contaminados, BASL4 evalúa una serie de procesos clave, como la degradación química, la volatilización, la lixiviación, la erosión, la difusión y el transporte en fase

adsorbida. Además, el modelo tiene en cuenta la degradación de la materia orgánica presente tanto en el suelo como en los biosólidos, lo que añade una capa adicional de complejidad a sus cálculos.

BASL4 no se limita solo al suelo, sino que también incluye submodelos para estimar la concentración de químicos en la biota asociada al suelo. Estos submodelos abarcan diferentes organismos, desde zanahorias hasta invertebrados del suelo y mamíferos que se alimentan de estos invertebrados. Al calcular las concentraciones en la biota a partir de las concentraciones en el suelo, BASL4 proporciona una visión integral del riesgo de absorción biótica y bioacumulación en los organismos que habitan en el suelo.

Aunque el modelo BASL4 proporciona una herramienta útil para evaluar el destino de los productos químicos orgánicos en suelos enmendados con biosólidos, tiene limitaciones, como no abordar el escurrimiento de productos químicos disueltos en agua o adsorbidos a partículas de suelo. Sin embargo, puede complementarse con otros modelos, como PRZM Pesticide Root Zone Model, para predecir las tasas de escurrimiento y estimar la pérdida neta de suelo en diferentes condiciones ambientales.

El modelo BASL4 es una herramienta valiosa para evaluar el destino a largo plazo de productos químicos en suelos modificados con biosólidos, así como para estimar el riesgo ambiental asociado con la presencia de estos químicos en los ecosistemas terrestres. Su capacidad para modelar una amplia gama de procesos y su enfoque en la interacción entre el suelo y la biota hacen de BASL4 una herramienta para la gestión ambiental y la toma de decisiones informadas en el ámbito de la contaminación del suelo.

## **Aplicaciones de los modelos de dispersión de contaminantes en aire**

Exploraremos el uso de modelos de dispersión de contaminantes en aire, destacando algunas de las herramientas más utilizadas en nuestro país. Desde aplicaciones reglamentarias hasta su uso en el ámbito de la gestión ambiental, analizaremos cómo estas herramientas pueden ser aplicadas en diferentes contextos. Tomaremos como ejemplo la legislación de la Provincia de Buenos Aires para ilustrar su uso por los organismos de control para garantizar la calidad del aire y proteger la salud pública (PBA-Decreto1074/18, 2024, PBA-Resolución 559/19, 2024).

Entre ellos veremos aplicaciones de los modelos tipo gaussianos. A pesar de las simplificaciones inherentes y las limitaciones que conlleva la aplicación de la ecuación gaussiana y otros modelos similares, su utilidad radica en su capacidad para proporcionar una representación probabilística de las concentraciones de contaminantes en un área específica. Estos modelos son especialmente útiles cuando se necesita comprender la distribución probable

de contaminantes generados por una fuente particular, y cómo esta distribución puede ser influenciada por las condiciones meteorológicas predominantes.

En este sentido se repasarán las etapas de cálculos denominadas

- Etapa I de sondeo simple
- Etapa II de sondeo detallado
- Etapa III de modelación detallada

En todos los casos se ejemplificarán los distintos procedimientos de cálculos asociados, como así también los resultados que se obtienen en cada una de ellas.

La ecuación gaussiana y modelos similares permiten a los investigadores y profesionales prever de manera aproximada cómo se dispersarán los contaminantes en el aire en función de factores como la velocidad y dirección del viento, la estabilidad atmosférica y otros parámetros meteorológicos relevantes. Aunque estos modelos simplifican la complejidad del sistema atmosférico y pueden no capturar completamente todos los procesos físicos involucrados en la dispersión de contaminantes, ofrecen una herramienta práctica y accesible para estimar el alcance y la magnitud de la contaminación en un área determinada. En resumen, a pesar de sus limitaciones, los modelos basados en la ecuación Gaussiana son valiosos para proporcionar una estimación inicial de la distribución probabilística de contaminantes en el aire, lo que permite a los tomadores de decisiones y profesionales en el campo de la gestión ambiental planificar y responder de manera más efectiva ante posibles riesgos para la salud y el ambiente (USEPA, 2024).

Para la aplicación de modelos de dispersión de contaminantes en aire, los datos meteorológicos son un componente clave en el modelado y la gestión ambiental. En este libro, examinaremos cómo se procesan y utilizan estos datos en la aplicación de diversos modelos de dispersión de contaminantes. Presentaremos el modelo WRPLOT View, una herramienta versátil que proporciona análisis detallados de datos meteorológicos, desde gráficos de rosas de viento hasta análisis de frecuencias. A través de ejemplos prácticos, demostraremos cómo estos datos pueden ser aprovechados en la gestión ambiental local para tomar decisiones informadas y mitigar riesgos (US-REF WRPLOT View, 2024).

## Bibliografía

Aral, M. M. (2010). *Environmental modeling and health risk analysis*. Springer Science & Business Media. ISBN 978-90-481-8607-5

Mackay, D., Joy, M., & Paterson, S. (1983). Un modelo de fugacidad de interacción cuantitativa de agua, aire y sedimentos (QWASI) para describir el destino de los productos químicos en los lagos. *Quimiosfera*, 12, 981–997.

Mackay, D. (2001). *Modelos ambientales multimedia: el enfoque de fugacidad* (2.ª ed., pp. 201–213). Lewis Publishers.

Massolo, L. (2015). *Introducción a las herramientas de gestión ambiental*. SEDICI, Universidad Nacional de La Plata.

Massolo, L. (2022). *Modelos de dispersión y distribución de contaminantes en el ambiente*. SEDICI, Universidad Nacional de La Plata.

Provincia de Buenos Aires. (2024, 2 de mayo). *Decreto 1074/2018 de la Dirección Ejecutiva del Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS)*. <https://normas.gba.gob.ar/ar-b/decreto/2018/1074/17866>

Provincia de Buenos Aires. (2024, 2 de mayo). *Resolución 559/2019 de la Dirección Ejecutiva del Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS)*. Sistema de Información Normativa y Documental. <https://normas.gba.gob.ar/ar-b/resolucion/2019/559/208176>

Trent University. (2024, 5 de mayo). *Resources and models*. <https://www.trentu.ca/cemc/resources-and-models>

United States Environmental Protection Agency. (2024, 4 de mayo). *Meteorological processors and accessory programs (WRPLOT View)*. <https://www.epa.gov/scram/meteorological-processors-and-accessory-programs>

United States Environmental Protection Agency. (2024, 2 de mayo). *Air quality dispersion modelling*. <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling#:~:text=Dispersion%20modeling%20uses%20mathematical%20formulations,at%20selected%20downwind%20receptor%20locations>

## CAPÍTULO 2

### Aplicación de QWASI y BASL4

**Resumen:** En este capítulo se realizará una presentación del modelo multisegmento QWASI (Interacción Cuantitativa Agua Aire Sedimento) el cual está diseñado para ayudar a comprender el destino de los compuestos químicos en cuerpos de agua describiendo el comportamiento en estado estacionario de una sustancia sujeta a los aportes por descarga directa de efluentes, entrada vía ríos o arroyos y la deposición atmosférica.

Luego se presentará el modelo BASL4 (Biosolid Modified Soil Level IV) el cual permite estimar el destino de contaminantes orgánicos en suelos que son enmendados con barros o lodos provenientes de plantas de tratamiento de efluentes líquidos o también biopilas. Su uso permite realizar evaluaciones para garantizar que los cultivos no se contaminen.

**Nota:** Se recomienda al lector repasar los contenidos del capítulo dos del libro de cátedra "Modelo de dispersión distribución de contaminantes 2022" Herramientas aplicadas a modelos multimediales.

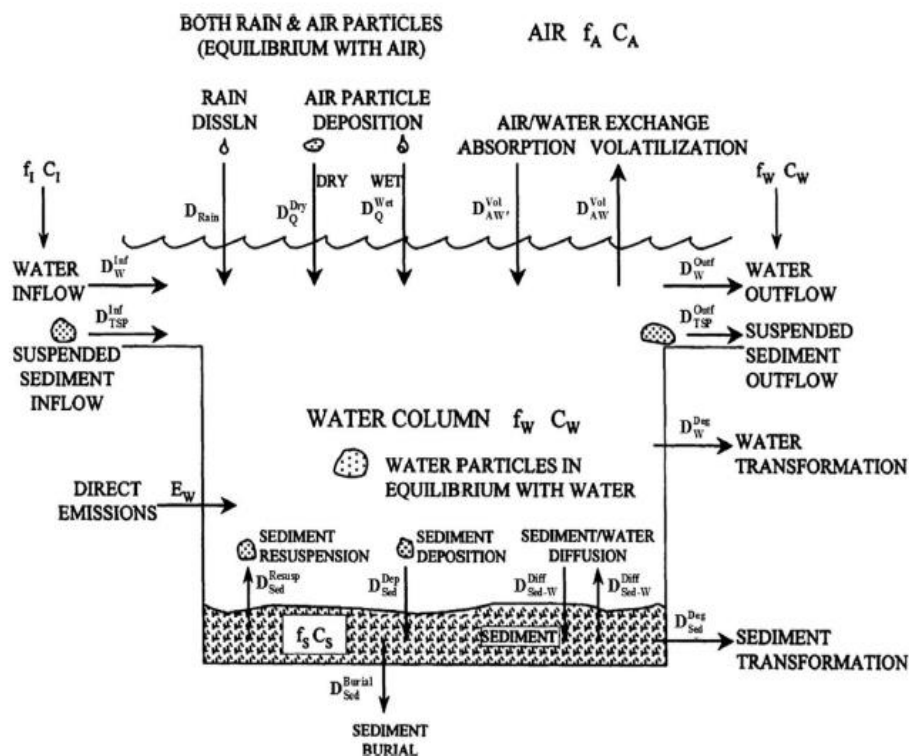
### Modelo Multimedial QWASI

Una vez establecidos los modelos de intercambio aire-agua y sedimento-agua desarrollados en Capítulos anteriores es relativamente sencillo combinarlos en un modelo desarrollado para cuerpos de agua como lagos agregando términos de reacción y advección asociados a las entradas y las salidas. El resultado es el modelo QWASI/ o "Interacción cuantitativa entre agua, aire y sedimentos" diseñado para ayudar a comprender el destino químico en los cuerpos de agua como lagos y lagunas.

El modelo QWASI/ describe el comportamiento en estado estacionario de una sustancia química orgánica en un cuerpo de agua sujeto a aportes químicos por descarga directa, afluencia en ríos y deposición desde la atmósfera. La sustancia química se elimina del lago por evaporación, reacción irreversible en el agua y los sedimentos, salida al agua y entierro de sedimentos. Las ecuaciones de balance de masa para la columna de agua bien mezclada y la capa bien mezclada de sedimento superficial también incluyen el intercambio sedimento-agua por difusión, deposición y resuspensión.

El modelo cuya primera versión fue publicada por Mackay et al. en 1983 en la evaluación de los PCBs en el lago Ontario, Canadá, y posteriormente se aplicó al lago Ontario (Mackay, 1989). Otros informes incluyen una aplicación a una variedad de productos químicos por Mackay y Diamond (1989), a productos químicos organoclorados producidos por la industria de la pulpa y el papel por Mackay y Southwood (1992), el uso de hojas de cálculo para ayudar a ajustar los valores de los parámetros al modelo (Southwood et al., 1989), a situaciones en las que las micro capas superficiales son importantes (Southwood et al., 1999), y a metales por Woodfine et al. (2000). En principio, el modelo QWASI se puede aplicar a cualquier cuerpo de agua bien mezclado para el cual se definan los flujos hidráulicos y de partículas suspendidas.

El modelo QWASI original se actualizó y publicó en formato de hoja de cálculo en 2014 (Mackay et al., 2014) la cual incluía métodos mejorados para obtener parámetros de entrada como las proporciones de partición. Esta versión está disponible en el sitio web de CEMC mediante el siguiente enlace <https://www.trentu.ca/cemc/resources-and-models/qwasi-quantitative-water-air-sediment-interaction-model>. El modelo permite al usuario definir la tasa de emisión y las entradas de advección al agua y la concentración del aire. Luego se calcula las fugacidades, las concentraciones y masas en agua y sedimentos, y todos los flujos involucrados.



**Figura 2.1** muestra los procesos de transporte y transformación en el modelo QWASI.

La **Tabla 2.1** enumera los valores  $D$  y la fugacidad correspondiente en las expresiones de velocidad. Los subíndices se refieren a agua (W), aire (A), sedimento (Sed), partículas suspendidas en agua (TSP), y partículas de aerosol en aire (Q) y lluvia (Rain). Los valores  $G$  son flujos ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) de una fase, por ejemplo,  $G_{sed}^{entierro}$  es la velocidad de entierro en sedimento en

$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ . Los superíndices se refieren a entierro (o Burial en inglés), resuspensión (Resusp), descomposición (Deg), y deposición de sedimento (Dep). Los superíndices de flujo advectivo indican el flujo de entrada (Inf) o salida (Outf) del compartimento correspondiente.

Luego  $k_{Sed}^{Deg}$  y  $k_W^{Deg}$  son las constantes de velocidad de degradación en sedimento y agua respectivamente cuya unidad está en  $(\text{h}^{-1})$ .

La  $k_{Sed-W}^{Ov}$  es un coeficiente de transferencia de masa sedimento-agua y  $k_{A-W}^{Ov}$  es un coeficiente global (lado del agua) de transferencia de masa aire-agua  $(\text{m}^3 \text{h}^{-1})$ .

$A_{AW}$  y  $A_{Sed-W}$  son las áreas de interfaz aire-agua y agua-sedimento respectivamente en  $\text{m}^2$ .  $V_W$  y  $V_{Sed}$  son volúmenes de agua y sedimento respectivamente en  $\text{m}^3$ .

| Proceso                          | Valor D            | Definición de valor D                                                              | multiplicando<br>Fugacidad |
|----------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Entierro de sedimentos           | $D_{Sed}^{Burial}$ | $C_{Sed}^{Burial} Z_{Sed}$                                                         | $f_{Sed}$                  |
| Transformación de sedimentos     | $D_{Sed}^{Deg}$    | $V_{Sed} k_{Sed}^{Deg} Z_{Sed}$                                                    | $f_{Sed}$                  |
| Resuspensión de sedimentos       | $D_{Sed}^{Resusp}$ | $C_{Sed}^{Resusp} Z_{Sed}$                                                         | $f_{Sed}$                  |
| Difusión de sedimentos a agua    | $D_{Sed-W}^{Diff}$ | $k_{Sed-W} A_{Sed-W} Z_{Sed}$                                                      | $f_{Sed}$                  |
| Difusión de agua a sedimentos    | $D_{W-Sed}^{Diff}$ | $k_{W-Sed} A_{Sed-W} Z_W$                                                          | $f_W$                      |
| Difusión neta de sedimento-agua  | $D_{Sed-W}^{Ov}$   | $\frac{1}{\left( \frac{1}{D_{Sed-W}^{Diff}} + \frac{1}{D_{W-Sed}^{Diff}} \right)}$ | $(f_{Sed} - f_W)$          |
| Deposición de sedimentos         | $D_W^{Dep}$        | $C_W^{Dep} Z_{Sed}$                                                                | $f_W$                      |
| Transformación de agua           | $D_W^{Deg}$        | $V_W k_W^{Deg} Z_W$                                                                | $f_W$                      |
| Volatilización                   | $D_{AW}^{Vol}$     | $k_{AW}^{Ov} A_{AW} Z_W$                                                           | $f_W$                      |
| Absorción                        | $D_{AW}^{Abs}$     | $k_{AW}^{Ov} A_{AW} Z_A$                                                           | $f_A$                      |
| Difusión neta aire-agua          | $D_{AW}^{Ov}$      | $\frac{1}{\left( \frac{1}{D_{AW}^{Abs}} + \frac{1}{D_{WA}^{Vol}} \right)}$         | $(f_A - f_W)$              |
| Salida de agua                   | $D_W^{Outf}$       | $C_W^{Outf} Z_W$                                                                   | $f_W$                      |
| Salida de partículas de agua     | $D_{TSP}^{Outf}$   | $C_{TSP}^{Outf} Z_{TSP}$                                                           | $f_W$                      |
| Disolución por lluvia            | $D_{Rain}$         | $C_{Rain} Z_W$                                                                     | $f_A$                      |
| Deposición de partículas húmedas | $D_Q^{Wet}$        | $G_Q^{Wet} Z_Q$                                                                    | $f_A$                      |
| Deposición de partículas secas   | $D_Q^{Dry}$        | $G_Q^{Dry} Z_Q$                                                                    | $f_A$                      |
| entrada de agua                  | $D_W^{Inf}$        | $C_W^{Inf} Z_W$                                                                    | $f_W^{Inf}$                |
| Entrada de partículas de agua    | $D_{TSP}^{Inf}$    | $C_{TSP}^{Inf} Z_{TSP}$                                                            | $f_W^{Inf}$                |
| Emissiones directas              | —                  | $E_W$                                                                              |                            |

**Tabla 2.1:** Valores de D en el modelo QWASI y sus fugacidades correspondientes.

Recordando que la tasa ( $\text{mol h}^{-1}$ ) para cualquier proceso es el producto del valor D y la fugacidad  $f$  tenemos:

$$r_W^{Inf} = D_W^{Inf} f_W^{Inf}$$

Dado que los valores D se suman, un análisis simple revela cuáles son las más relevantes y, por lo tanto, controlan el destino general del compuesto químico. Por ejemplo, si difusión neta aire-agua  $D_{AW}^{Ov}$  excede ampliamente a la deposición de las partículas secas, húmedas y la disolución por lluvia es decir las  $D_Q^{Dry}$ ,  $D_Q^{Wet}$  y  $D_{Rain}$  respectivamente, es evidente que la mayor parte de la transferencia de aire a agua se produce por absorción. Las magnitudes relativas de los procesos de eliminación del agua son particularmente interesantes. Estos ocurren en el denominador de la ecuación  $f_w$  como volatilización ( $D_w^{Vol}$ ), reacción ( $D_w^{Deg}$ ), salida de agua ( $D_w^{Outf}$ ), salida de partículas ( $D_Q^{Outf}$ ) y un término que describe la pérdida neta al sedimento. La pérdida bruta al sedimento será ( $D_{Sed}^{Dep} + D_{W-Sed}^{Diff}$ ), pero solo una fracción de esto se retiene en el sedimento:

$$\text{Fracción Retenida en el Sedimento: } \frac{D_{Sed}^{Deg} + D_{Sed}^{Burial}}{D_{Sed}^{Resusp} + D_{Sed-W}^{Diff} + D_{Sed}^{Deg} + D_{Sed}^{Burial}}$$

La fracción restante que se devuelve al agua será:

$$\text{Fracción retornada al agua: } \frac{D_{Sed}^{Resusp} + D_{Sed-W}^{Diff}}{D_{Sed}^{Resusp} + D_{Sed-W}^{Diff} + D_{Sed}^{Deg} + D_{Sed}^{Burial}}$$

Los detalles de las ecuaciones en el modelo QWASI de estado estacionario son los siguientes:

1. Las tasas de entrada al sedimento son iguales a las de salida bajo condiciones de estado estacionario, es decir:

$$\sum^{\text{All sources}} r_{\text{Sed}}^{\text{In}} = \sum^{\text{All losses}} r_{\text{Sed}}^{\text{Out}}$$

$$r_{W-\text{Sed}}^{\text{Diff}} + r_W^{\text{Dep}} = r_{\text{Sed}-W}^{\text{Diff}} + r_{\text{Sed}}^{\text{Resusp}} + r_{\text{Sed}}^{\text{Deg}} + r_{\text{Sed}}^{\text{Burial}}$$

$$f_W (D_{\text{Sed}-W}^{\text{Ov}} + D_W^{\text{Dep}}) = f_{\text{Sed}} (D_{\text{Sed}-W}^{\text{Ov}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Resusp}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Deg}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Burial}})$$

La fugacidad correspondiente al sedimento puede entonces expresarse como:

$$f_{\text{Sed}} = \frac{f_W (D_{\text{Sed}-W}^{\text{Ov}} + D_W^{\text{Dep}})}{(D_{\text{Sed}-W}^{\text{Ov}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Resusp}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Deg}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Burial}})}$$

2. Balance de masa de agua y fugacidad:

De la misma manera que con el sedimento, las tasas de entrada al agua son iguales a las de salida bajo condiciones de estado estacionario, entonces tenemos:

$$\begin{aligned} r_W^{\text{Em}} + r_W^{\text{Inf}} + r_{TSP}^{\text{Inf}} + r_{AW}^{\text{Diff}} + r_Q^{\text{Dry}} + r_Q^{\text{Wet}} + r_{\text{Rain}} + r_{\text{Sed}}^{\text{Resusp}} + r_{\text{Sed}-W}^{\text{Diff}} \\ = r_{WA}^{\text{Diff}} + r_W^{\text{Outf}} + r_{TSP}^{\text{Outf}} + r_{W-\text{Sed}}^{\text{Diff}} + r_W^{\text{Dep}} + r_W^{\text{Deg}} \end{aligned}$$

En otras palabras,

$$\begin{aligned}
 E_W + f_W^{\text{Inf}} (D_W^{\text{Inf}} + D_{TSP}^{\text{Inf}}) + f_A (D_{AW}^{\text{Ov}} + D_Q^{\text{Dry}} + D_Q^{\text{Wet}} + D_{\text{Rain}}) + f_{\text{Sed}} (D_{\text{Sed}}^{\text{Resusp}} + D_{\text{Sed-W}}^{\text{Ov}}) \\
 = f_W (D_{AW}^{\text{Ov}} + D_W^{\text{Deg}} + D_W^{\text{Outf}} + D_{TSP}^{\text{Outf}} + D_W^{\text{Dep}} + D_{W-\text{Sed}}^{\text{Ov}})
 \end{aligned}$$

La fugacidad correspondiente del agua puede entonces ser expresada como:

$$f_W = \frac{E_W + f_W^{\text{Inf}} (D_W^{\text{Inf}} + D_{TSP}^{\text{Inf}}) + f_A (D_{AW}^{\text{Ov}} + D_Q^{\text{Dry}} + D_Q^{\text{Wet}} + D_{\text{Rain}}) + f_{\text{Sed}} (D_{\text{Sed}}^{\text{Resusp}} + D_{\text{Sed-W}}^{\text{Ov}})}{(D_{AW}^{\text{Ov}} + D_W^{\text{Deg}} + D_W^{\text{Outf}} + D_{TSP}^{\text{Outf}} + D_W^{\text{Dep}} + D_{W-\text{Sed}}^{\text{Ov}})}$$

Tener en cuenta que el modelo QWASI asume una fugacidad constante en la fase del aire, de modo que  $f_A$  es un parámetro establecido por las condiciones iniciales y no varía. Además, se asume que la fugacidad del agua de entrada es constante. Por lo tanto, tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas,  $f_W$  y  $f_{\text{Sed}}$ .

### 3. Determinando la fugacidad del agua:

Al resolver por sustitución para  $f_W$  conduce a:

$$\begin{aligned}
 E_W + f_W^{\text{Inf}} (D_W^{\text{Inf}} + D_{TSP}^{\text{Inf}}) + f_A (D_{AW}^{\text{Ov}} + D_Q^{\text{Dry}} + D_Q^{\text{Wet}} + D_{\text{Rain}}) \\
 + \left[ \frac{f_W (D_{\text{Sed-W}}^{\text{Ov}} + D_W^{\text{Dep}})}{(D_{\text{Sed-W}}^{\text{Ov}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Resusp}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Deg}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Burial}})} \right] (D_{\text{Sed}}^{\text{Resusp}} + D_{\text{Sed-W}}^{\text{Ov}}) \\
 f_W = \frac{(D_{AW}^{\text{Ov}} + D_W^{\text{Deg}} + D_W^{\text{Outf}} + D_{TSP}^{\text{Outf}} + D_W^{\text{Dep}} + D_{W-\text{Sed}}^{\text{Ov}})}{
 \end{aligned}$$

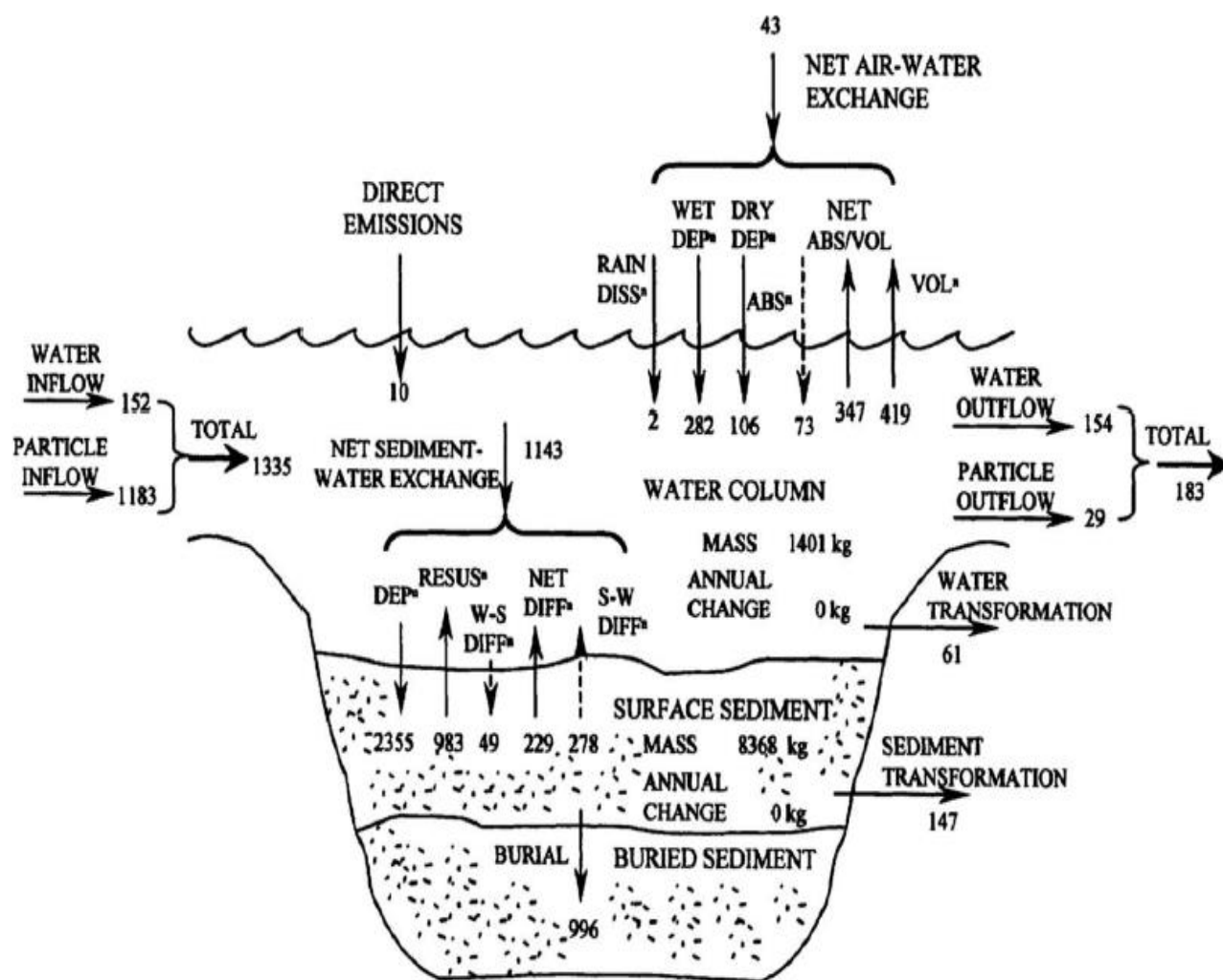
En otras palabras,

$$f_W = \frac{E_W + f_W^{\text{Inf}} (D_W^{\text{Inf}} + D_{TSP}^{\text{Inf}}) + f_A (D_{AW}^{\text{Ov}} + D_Q^{\text{Dry}} + D_Q^{\text{Wet}} + D_{\text{Rain}})}{(D_{AW}^{\text{Ov}} + D_W^{\text{Deg}} + D_W^{\text{Outf}} + D_{TSP}^{\text{Outf}} + D_W^{\text{Dep}} + D_{W-\text{Sed}}^{\text{Ov}}) - \left[ \frac{(D_{\text{Sed}-W}^{\text{Ov}} + D_W^{\text{Dep}})(D_{\text{Sed}}^{\text{Deg}} + D_{\text{Sed}-W}^{\text{Burial}})}{(D_{\text{Sed}-W}^{\text{Ov}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Resusp}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Deg}} + D_{\text{Sed}}^{\text{Burial}})} \right]}$$

Una vez que se conoce la fugacidad del agua, la fugacidad del sedimento se calcula a partir de la expresión inicial para  $f_{\text{Sed}}$  dada anteriormente. Esto proporciona todo el conjunto de fugacidades, concentraciones, masas y flujos en estado estacionario para las entradas definidas desde la emisión, el flujo de agua y los ingresos atmosféricos.

La solución en estado estacionario describe las condiciones que se alcanzarán después de una exposición prolongada del cuerpo de agua (lago, laguna) en condiciones de entrada constantes, es decir, emisiones, fugacidad del aire y fugacidad del agua de entrada.

Cuando se resuelven las ecuaciones, las concentraciones, cantidades y flujos se pueden calcular. Una ilustración de tal resultado se presenta en la Figura 2.2 para los PCB en el lago Ontario (Mackay, 1989). Estos diagramas de balance de masa muestran claramente qué procesos son más importantes para el compuesto químico de interés.



**Figura 2.2** Resultados ilustrativos de un cálculo del modelo QWASI sobre el comportamiento en estado estable de los PCB en el lago Ontario (Mackay, 1989).

## Ejemplo de aplicación ilustrativo del Modelo QWASI

A continuación, repasaremos la carga de datos para la simulación de un reparto en un escenario de análisis.

1. Descargado el modelo e instalado procederemos a abrirlo en este caso utilizaremos versión Visual Basic 3.00 (2005). Link de descarga:

(<https://www.trentu.ca/cemc/resources-and-models/qwasi-quantitative-water-air-sediment-interaction-model>). Figura 2.3

2. Menú principal para inicio de la simulación se ingresa el título de la misma y un subtítulo opcional, Figuras 2.4 y 2.5

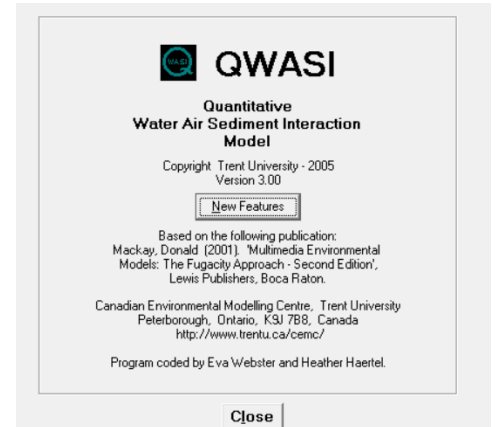
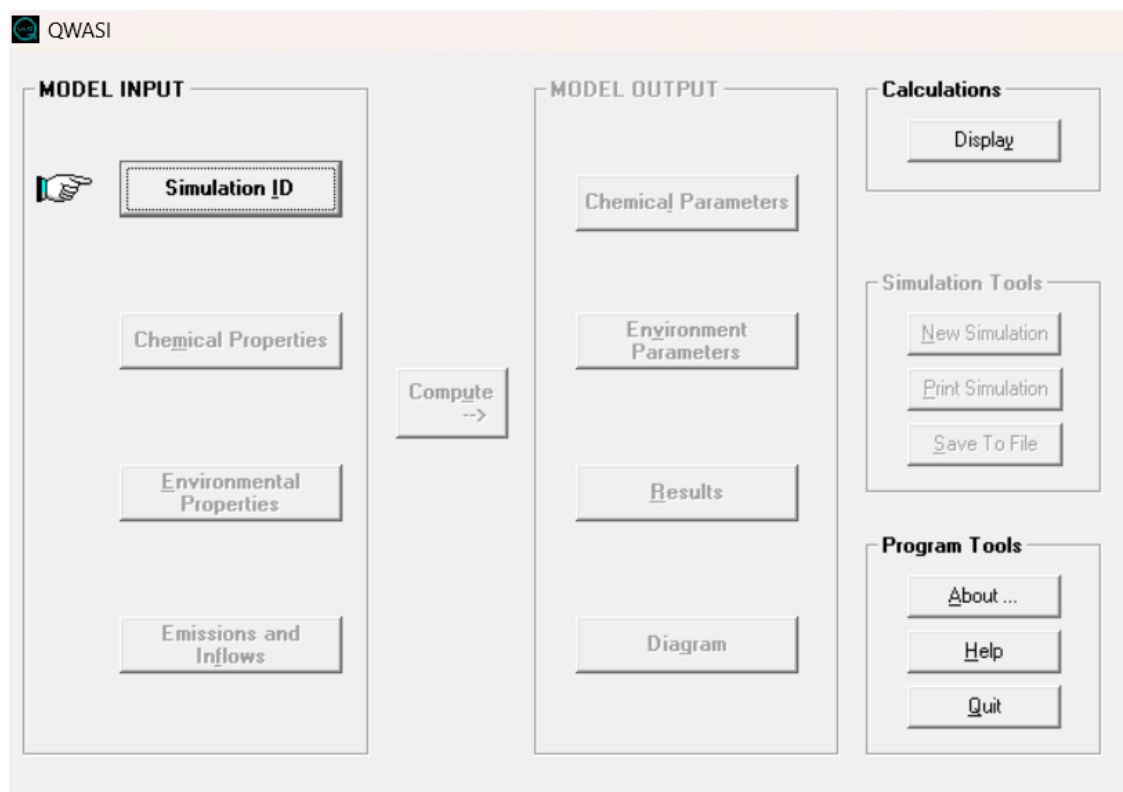
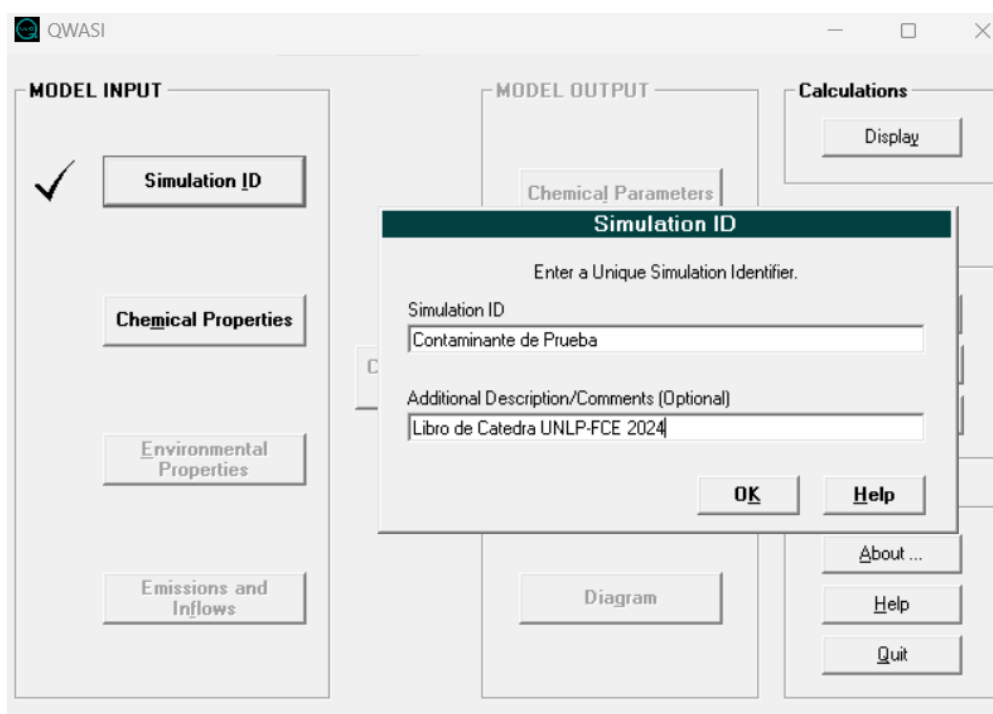


Figura 2.3

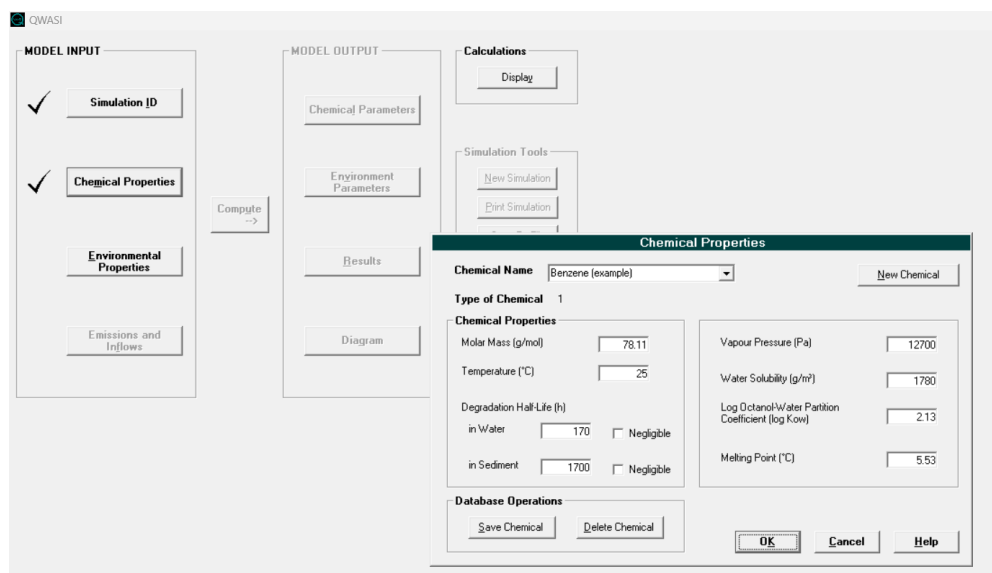


Figuras 2.4 Menú principal e inicio de la simulación



**Figura 2.5** Menú principal y carga del título de la modelación

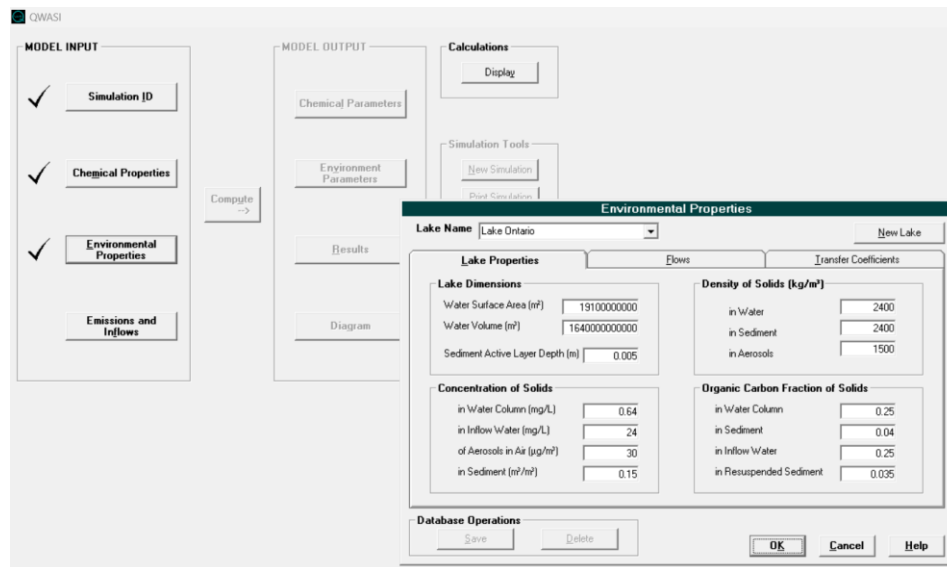
3. Selección de contaminante y carga de sus propiedades fisicoquímicas, figura 2.6.



**Figura 2.6** Como observamos se seleccionó el contaminante benceno, de una lista desplegable con propiedades precargadas, dicha lista viene por default en esta versión, pero también puede editarse además de agregar nuevos compuestos.

Aquí encontramos como datos de entrada el peso molecular del compuesto, la temperatura definida para sus constantes de equilibrio, las vidas medias en los compartimientos de agua y sedimentos, la presión de vapor, solubilidad y punto de fusión.

4. Carga de las características del entorno en este caso del cuerpo de agua, donde fue seleccionada la opción precargada asociada al lago Ontario de Canadá. Figura 2.7.



**Figura 2.7**

También se pueden agregar nuevos escenarios a modelar para ello es necesario contar con los siguientes datos asociados al cuerpo de agua los cuales se agrupan entre categorías, a saber:

**A. Propiedades del Lago:**

- Dimensiones:
  - Superficie del Lago (m<sup>2</sup>)
  - Volumen del Lago (m<sup>3</sup>)
  - Profundidad de Sedimentos de contacto activo en (m)
- Concentración de Sólidos:
  - En la columna de agua (mg/L)
  - En el flujo de agua de entrada al sistema (mg/L)
  - En los aerosoles del aire (ug/m<sup>3</sup>)
  - En los sedimentos (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)
- Densidad de Sólidos (Kg/m<sup>3</sup>)
  - En agua
  - En sedimentos
  - En aerosoles
- Fracción de Carbono Orgánico en Sólidos
  - En la columna de agua
  - En sedimentos
  - En el flujo de entrada de agua al sistema
  - En los sedimentos resuspendidos

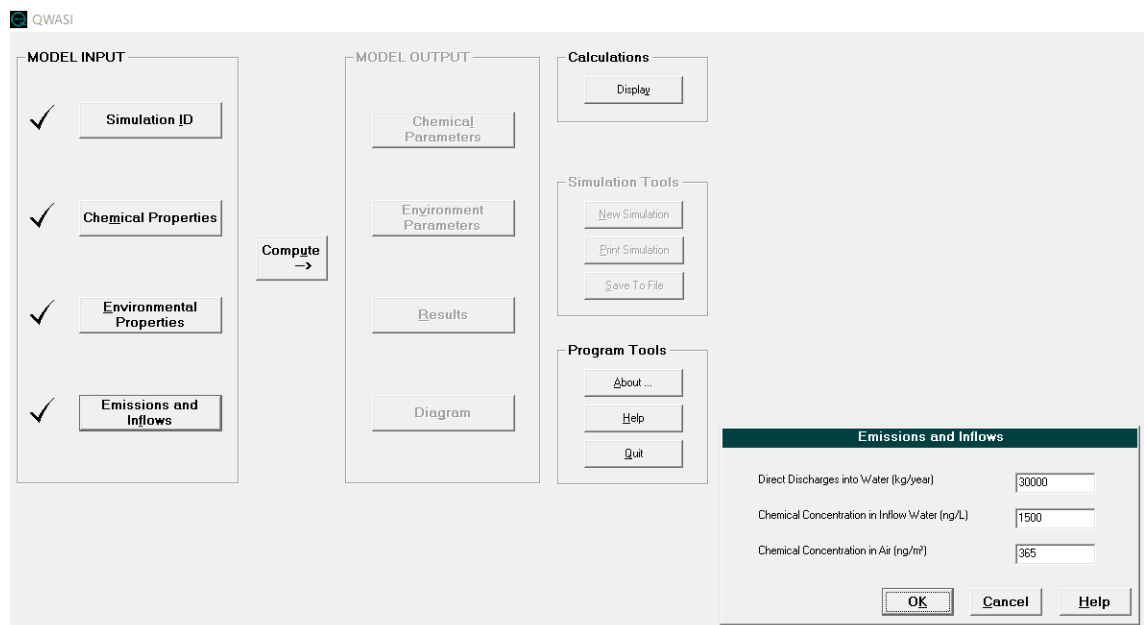
## B. Flujos

- Agua (m<sup>3</sup>/h)
  - Flujos de entrada del río
  - Flujos de salida del río
- Sedimentos (g/m<sup>2</sup> día)
  - Velocidad de Deposición de Sólidos
  - Velocidad de enterramiento de sedimentos
  - Velocidad de resuspensión de sólidos

## C. Coeficientes de transferencia

- Parámetros de Deposición Atmosférica
  - Velocidad de deposición seca de aerosoles (m/h)
  - Relación de evacuación (relación de aire por volumen de lluvia)
  - Tasa de lluvia en m/año
- Coeficientes de transferencia de masas (MTC) m/h
  - Volatilización MTC (lado aire)
  - Volatilización MTC (lado agua)
  - Difusión de sedimento-agua MTC

5. Carga de emisiones y flujos, figura 2.8, en este caso se cargaron 30 toneladas anuales con una concentración en los flujos de entrada de 1.5 mg/m<sup>3</sup> y una concentración en calidad de aire 365 ng/m<sup>3</sup>



**Figura 2.8**

## 6. Cálculo

Finalmente, se procede al cómputo de los datos de entrada, haciendo clic en el botón compute figura 2.9, obteniendo las salidas u output observadas dentro del recuadro model output de la misma imagen.

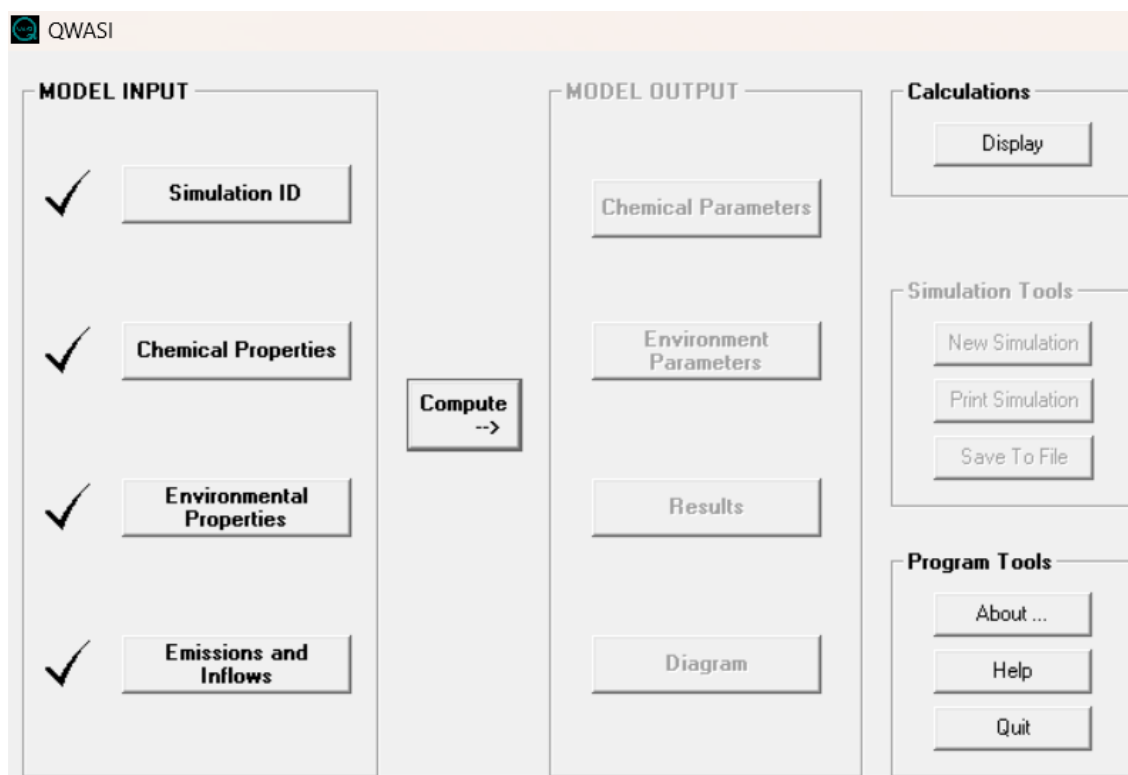


Figura 2.9

7. Realizados los cálculos observamos como datos de salida un resumen inicial con las parámetros químicos integrados en tres secciones:

- Propiedades fisicoquímicas del compuesto. Figura 2.10
- Coefficientes de Partición Calculados. Figura 2.11.
- Vidas medias o semividas. Figura 2.12.

| Chemical Parameters  |                        |              |
|----------------------|------------------------|--------------|
| Benzene (example)    |                        |              |
| Physical Properties  | Partition Coefficients | Half-lives   |
| Chemical Type        | 1                      |              |
| Molar Mass           | 78.11 g/mol            |              |
| Temperature          | 25.00 °C               | 298 K        |
| Log Kow              | 2.13                   |              |
| Solubility           | 1780 g/m³              | 22.79 mol/m³ |
| Vapour Pressure      | 12700 Pa               |              |
| Melting Point        | 5.53 °C                | 279 K        |
| Sub-cooled Liquid    |                        |              |
| Vapour Pressure      | 12700 Pa               |              |
| Fugacity Ratio       | 1.00                   |              |
| Henry's Law Constant | 557 Pa m³/mol          |              |

Figura 2.10

|                                   | Dimensionless | L/kg  |
|-----------------------------------|---------------|-------|
| Air-Water ( $K_{ow}$ )            | 0.2248        | -     |
| Suspended Particles-Water         | 33.18         | 13.83 |
| Sediment-Water                    | 5.31          | 2.21  |
| Resuspended Particles-Water       | 4.65          | 1.94  |
| Aerosol-Air                       | 472           | -     |
| Organic Carbon-Water ( $K_{oc}$ ) | -             | 55.31 |

Figura 2.11

|          | Half-Life<br>h | Rate Constant<br>1/h |
|----------|----------------|----------------------|
| Water    | 170            | 4.08E-03             |
| Sediment | 1700           | 4.08E-04             |

Figura 2.12

8. Parámetros del entorno ambiental: relacionadas con los parámetros del cuerpo del agua agrupadas en tres secciones:

a. Información sobre el lago. Figura 2.13

b. Propiedades de las partículas. Figura 2.14.

c. Velocidades de transferencia. Figura 2.15.

|          | Area<br>m² | Depth<br>m | Volume<br>m³ |
|----------|------------|------------|--------------|
| Water    | 1.91E+10   | 85.86      | 1.64E+12     |
| Sediment | 1.91E+10   | 5.00E-03   | 9.55E+07     |

|                     | Inflow        | Outflow       |
|---------------------|---------------|---------------|
| Water               | 2.20E+07 m³/h | 2.60E+07 m³/h |
| Suspended Particles | 220 m³/h      | 6.93 m³/h     |

Sediment Subcompartment Volumes, m³

|            | Volume   |
|------------|----------|
| Solids     | 1.43E+07 |
| Pore-Water | 8.12E+07 |

Figura 2.13

|                           | Density<br>kg/m³ | Concentration of Particle<br>mg/L | Volume Fraction | OC Fraction |
|---------------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------|
| Particles In Water Column | 2400             | 0.6400                            | 2.67E-07        | 0.25        |
| Sediment Solids           | 2400             | -                                 | 0.1500          | 0.04        |
| Inflow Particles          | 2400             | 24.00                             | 1.00E-05        | 0.25        |
| Resuspended Particles     | 2400             | -                                 | -               | 0.035       |
| Aerosols In Air           | 1500             | 30.00                             | 2.00E-11        | -           |

Figura 2.14

|                                 | Mass Transfer Coefficients<br>m/h |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| Volatilization (air side)       | 1.00                              |
| Volatilization (water side)     | 0.0100                            |
| Sediment-water Diffusion        | 4.00E-04                          |
| Aerosol Dry Deposition Velocity | 7.20                              |
| Aerosol Scavenging Ratio        | 2.00E+05                          |

|                       | Rain Rate<br>m³/h | 0.9200 m³/year  | Aerosol Deposition Rate<br>m³/h |
|-----------------------|-------------------|-----------------|---------------------------------|
| Sediment Deposition   | 464               | 1.40 g/m²/day   | Wet 8.02                        |
| Sediment Resuspension | 199               | 0.6000 g/m²/day | Dry 2.75                        |
| Sediment Burial       | 199               | 0.6000 g/m²/day | Total 10.77                     |

Figura 2.15

## 9. Resultados

En esta sección observaremos los resultados de forma numérica agrupados en siete secciones:

a. Datos de entrada del compuesto a modelar. Figura 2.16

| Results                                                                                                                                                                                                                                             |                  |          |               |                 |              |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|---------------|-----------------|--------------|----------|
| Benzene (example)                                                                                                                                                                                                                                   |                  |          |               | Lake Ontario    |              |          |
| Chemical Input                                                                                                                                                                                                                                      | Phase Properties | Z Values | Mass Balances | Residence Times | Rate Details | D Values |
| <div> <div>Emission</div> <div>30000</div> <div>kg/year</div> </div> <div> <div>Chemical Concentration in Inflow</div> <div>1500</div> <div>ng/L</div> </div> <div> <div>Chemical Concentration in Air</div> <div>365</div> <div>ng/m³</div> </div> |                  |          |               |                 |              |          |

Figura 2.16

b. Propiedades de cada fase (compartimientos y subcompartimiento). Figura 2.17

| Chemical Input      | Phase Properties | Z Values     | Mass Balances          | Residence Times | Rate Details         | D Values      |
|---------------------|------------------|--------------|------------------------|-----------------|----------------------|---------------|
|                     | Fugacity<br>Pa   | Amount<br>kg | Concentration<br>kg/m³ | Concentration   | Concentration        | Concentration |
|                     |                  |              |                        |                 | mol/m³ of bulk phase |               |
| Bulk Air            | 1.16E-05         |              | 3.65E-10               | 365             | ng/m³                |               |
| Air vapour          |                  |              | 3.65E-10               |                 |                      |               |
| Aerosols            |                  |              | 1.72E-07               |                 |                      | 4.42E-17      |
| Bulk Water          | 3.80E-05         | 8736         | 5.33E-09               | 5.33            | ng/L                 |               |
| Water Solution      |                  | 8736         | 5.33E-09               |                 |                      |               |
| Water Particles     |                  | 0.0773       | 1.77E-07               | 0.0737          | ng/g                 | 6.03E-13      |
| Bulk Inflow         | 0.0107           |              | 1.50E-06               | 1500            | ng/L                 |               |
| Inflow Water        |                  |              | 1.50E-06               |                 |                      |               |
| Inflow Particles    |                  |              | 4.98E-05               |                 |                      | 6.37E-09      |
| Bulk Sediment       | 3.78E-05         | 0.8320       | 8.71E-09               | 8713            | ng/m³                |               |
| Sediment Pore Water |                  | 0.4296       | 5.29E-09               | 5.29            | ng/L                 |               |
| Sediment Solids     |                  | 0.4025       | 2.81E-08               | 0.0117          | ng/g                 | 5.40E-08      |
| Rain                | 1.16E-05         |              | 1.62E-09               | 1.62            | ng/L                 |               |
| System Total        |                  | 8737         |                        |                 |                      |               |

☒ kg and kg/m³  
☐ mol and mol/m³

Figura 2.17

- c. Valores de *Capacidad de Fugacidad* ( $Z$  en mol m<sup>-3</sup> Pa<sup>-1</sup>), definida como relación entre fugacidad ( $f$ , Pa) y concentración ( $C$ , mol m<sup>-3</sup>) se expresa mediante la ecuación:

$$C = Zf$$

Valores  $Z$  grandes; un producto químico fácilmente soluble en una fase, puede absorber una gran cantidad del producto químico. Un valor bajo de  $Z$  indica que la fase puede aceptar sólo una pequeña cantidad de producto químico, es decir, el producto químico es "menos soluble" en la fase. Figura 2.18

| Chemical Input         | Phase Properties | <b>Z Values</b> | Mass Balances         | Residence Times | Rate Details | D Values |
|------------------------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------|----------|
|                        |                  |                 | mol/m <sup>3</sup> Pa |                 |              |          |
| Bulk Air               |                  |                 | 4.03E-04              |                 |              |          |
| Air Vapour             |                  |                 | 4.03E-04              |                 |              |          |
| Aerosols               |                  |                 | 0.1906                |                 |              |          |
| Bulk Water             |                  |                 | 1.79E-03              |                 |              |          |
| Water Solution         |                  |                 | 1.79E-03              |                 |              |          |
| Water Particles        |                  |                 | 0.0595                |                 |              |          |
| Bulk Inflow Water      |                  |                 | 1.79E-03              |                 |              |          |
| Inflow Water Particles |                  |                 | 0.0595                |                 |              |          |
| Bulk Sediment          |                  |                 | 2.95E-03              |                 |              |          |
| Sediment Solids        |                  |                 | 9.53E-03              |                 |              |          |
| Resuspended Particles  |                  |                 | 8.34E-03              |                 |              |          |

Figura 2.18

- d. Balances de masas del compuesto por compartimiento teniendo en cuenta el estado estacionario. Figura 2.19

| Chemical Input             | Phase Properties | Z Values | <b>Mass Balances</b> | Residence Times | Rate Details | D Values |
|----------------------------|------------------|----------|----------------------|-----------------|--------------|----------|
| <b>In the Water</b>        |                  |          |                      |                 |              |          |
| Total Chemical Inputs      |                  | 3.22E+05 |                      |                 |              |          |
| Emission                   |                  | 30000    |                      |                 |              |          |
| Inflow                     |                  | 2.89E+05 |                      |                 |              |          |
| Air to water transfer      |                  | 2629     |                      |                 |              |          |
| Sediment to water transfer |                  | 354      |                      |                 |              |          |
| Total Chemical Losses      |                  | 3.22E+05 |                      |                 |              |          |
| Outflow                    |                  | 1213     |                      |                 |              |          |
| Water to air transfer      |                  | 8533     |                      |                 |              |          |
| Water to sediment transfer |                  | 357      |                      |                 |              |          |
| Transformation in water    |                  | 3.12E+05 |                      |                 |              |          |
| <b>In the Sediment</b>     |                  |          |                      |                 |              |          |
| Total Chemical Inputs      |                  | 357      |                      |                 |              |          |
| Water to sediment transfer |                  | 357      |                      |                 |              |          |
| Total Chemical Losses      |                  | 357      |                      |                 |              |          |
| Sediment to water transfer |                  | 354      |                      |                 |              |          |
| Transformation in sediment |                  | 2.97     |                      |                 |              |          |
| Sediment Burial            |                  | 0.0490   |                      |                 |              |          |
| <b>In the System</b>       |                  |          |                      |                 |              |          |
| Total Chemical Inputs      |                  | 3.22E+05 |                      |                 |              |          |
| Emission                   |                  | 30000    |                      |                 |              |          |
| Inflow                     |                  | 2.89E+05 |                      |                 |              |          |
| Air to water transfer      |                  | 2629     |                      |                 |              |          |
| Total Chemical Losses      |                  | 3.22E+05 |                      |                 |              |          |
| Outflow                    |                  | 1213     |                      |                 |              |          |
| Water to air transfer      |                  | 8533     |                      |                 |              |          |
| Total Transformation       |                  | 3.12E+05 |                      |                 |              |          |
| Sediment Burial            |                  | 0.0490   |                      |                 |              |          |

☒ kg/year  
☐ mol/h

Figura 2.19

- e. Tiempos de residencia en kilogramos por año, por día y en moles por hora. Figura 2.20

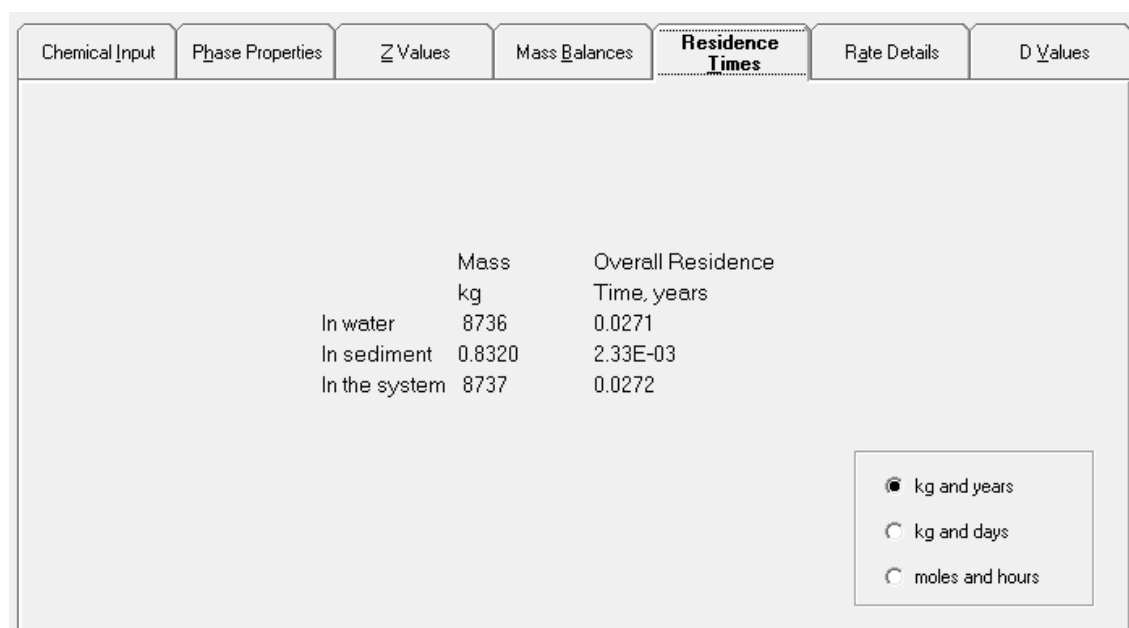


Figura 2.20.

- f. Detalle de tasas de flujos en kilogramos por año y en moles por hora. Figura 2.21

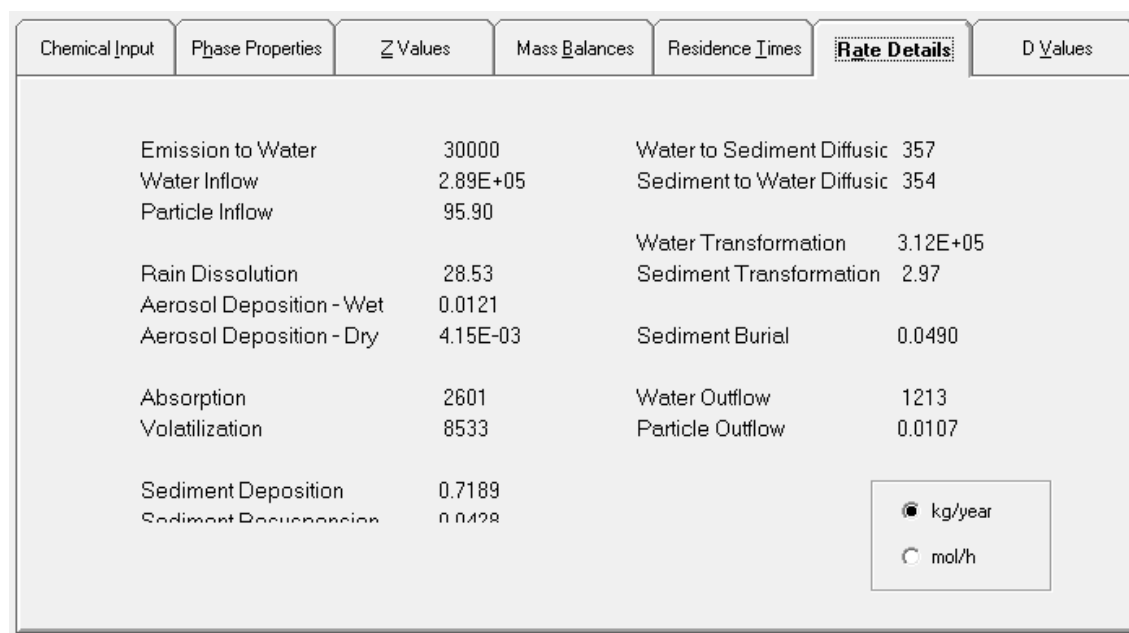


Figura 2.21

- g. Valor de velocidad de transferencia del compuesto de una fase a otra “D” (sea de ingreso por emisión, advección o de degradación) luego se calculan los diversos valores D para los procesos de salida o pérdida, en años, días u horas. Figura 2.22

| Chemical Input | Phase Properties            | Z Values | Mass Balances       | Residence Times                    | Rate Details                          | D Values |
|----------------|-----------------------------|----------|---------------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------|
|                |                             |          | D Value<br>mol/Pa.h | Response Time<br>of Water<br>years | Response Time<br>of Sediment<br>years |          |
|                | Burial                      |          | 1.90                |                                    | 16.99                                 |          |
|                | Sediment Transformation     |          | 115                 |                                    | 0.2800                                |          |
|                | Sediment Resuspension       |          | 1.66                | 2.03E+05                           | 19.42                                 |          |
|                | Water To Sediment Diffusion |          | 13709               | 24.50                              | 2.35E-03                              |          |
|                | Sediment Deposition         |          | 27.64               | 12153                              | 1.17                                  |          |
|                | Water Transformation        |          | 1.20E+07            | 0.0280                             |                                       |          |
|                | Volatilization              |          | 3.28E+05            | 1.02                               |                                       |          |
|                | Water Outflow               |          | 46653               | 7.20                               |                                       |          |
|                | Water Particle Outflow      |          | 0.4128              | 8.14E+05                           |                                       |          |
|                | Rain Dissolution            |          | 3599                | 93.33                              |                                       |          |
|                | Wet Particle Deposition     |          | 1.53                | 2.20E+05                           |                                       |          |
|                | Dry Particle Deposition     |          | 0.5242              | 6.41E+05                           |                                       |          |
|                | Water Inflow                |          | 39476               | 8.51                               |                                       |          |
|                | Water Particle Inflow       |          | 12.18               | 250.44                             |                                       |          |

☒ years  
☐ days  
☐ hours

Figura 2.22

## 10. Diagrama gráfico de resultados

Finalmente se representan el diagrama (Figura 2.23) con los resultados finales donde se observa: la masa total de Benceno que ingresa al sistema vía el compartimiento agua (Water); las concentraciones y fugacidades asociadas al flujo de ingreso; los valores de “D” velocidades de transferencia de compuesto de una fase a otra, de un sistema fuera del equilibrio, asociados a los tres compartimientos principales Aire, Agua y Sedimentos; las pérdidas de compuesto por reacción y advección (flujos de salida y enterramiento); los tiempos de residencia y las masas totales repartidas del sistema en estado estacionario.

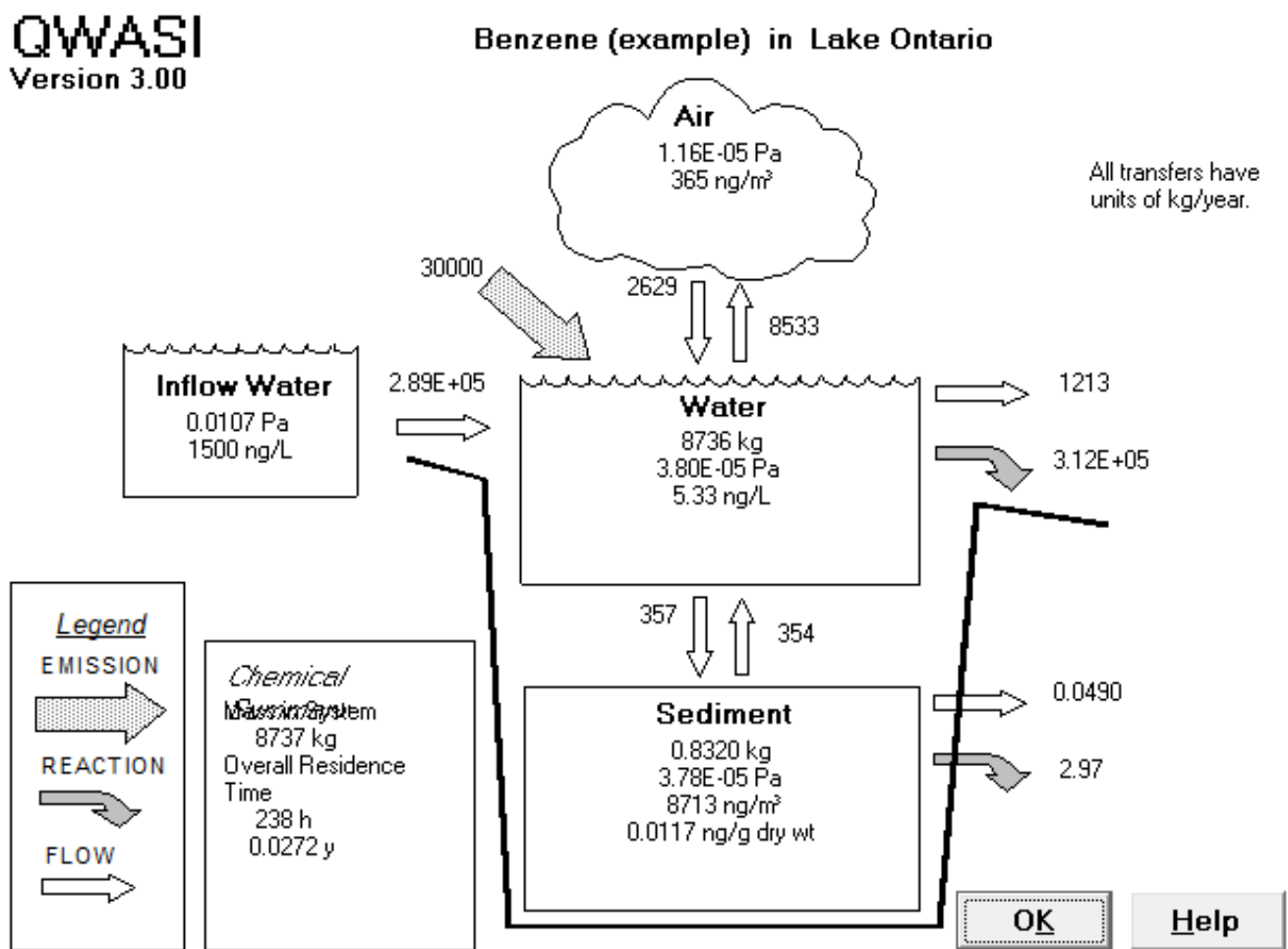


Figura 2.23. Salida Gráfica de la modelación utilizando el modelo QWASI Versión 3.00

## Modelo Multimedial BASL4

**Resumen:** El modelo BASL4, también conocido como el Modelo de Destino Químico para Suelos Enmendados con Lodos y Biopilas (Modelo de Nivel IV), es una herramienta sofisticada diseñada para simular el comportamiento de sustancias químicas orgánicas presentes en biosólidos o lodos residuales derivados del tratamiento de efluentes líquidos, los cuales se utilizan como enmiendas en suelos. Este modelo aborda una amplia gama de procesos, incluyendo la degradación química de compuestos, la volatilización, lixiviación y sorción en la materia orgánica en descomposición (MO).

Una de las características distintivas del BASL4 es su capacidad para considerar la absorción en organismos específicos, como invertebrados (gusanos), pequeños mamíferos (musarañas) y la vegetación, utilizando tres niveles de complejidad:

- Partición de equilibrio simple.
- Bioacumulación en estado estacionario.
- Bioacumulación dinámica.

Además, el modelo incluye seis submodelos de biota, cada uno diseñado para representar diferentes aspectos de la dinámica de concentración en la biota, desde modelos estáticos hasta modelos dinámicos.

BASL4 es una herramienta valiosa para evaluar el destino a largo plazo de sustancias químicas en suelos enmendados con biosólidos, como los utilizados en prácticas agrícolas como el *landfarming*. También es útil para estimar el riesgo de absorción y bioacumulación en organismos del suelo, así como para evaluar los riesgos asociados para la vida silvestre, como la biomagnificación en las redes alimentarias terrestres. Su capacidad para proporcionar información detallada sobre la dinámica de concentración en la biota lo convierte en una herramienta poderosa para la gestión ambiental y la toma de decisiones en la gestión de suelos y gestión de residuos

## Introducción

La aplicación de aguas residuales tratadas, y sus subproductos deshidratados conocidos como "biosólidos", en el suelo es una práctica comúnmente adoptada como medio para la eliminación de lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales, así como para su posterior uso como enmienda del suelo. Los biosólidos tienen la capacidad de mejorar la estructura del suelo al incrementar su contenido de materia orgánica, al tiempo que proporcionan valiosos nutrientes como fósforo y nitrógeno, especialmente valioso en suelos empobrecidos.

Estos biosólidos son el resultado final del tratamiento de aguas residuales domésticas, comerciales e industriales. Dado su origen, son susceptibles a la contaminación por una amplia gama de sustancias. A pesar de esto, los lodos resultantes del tratamiento ofrecen una alternativa económica, beneficiosa y respetuosa con el ambiente en comparación con métodos de eliminación como la incineración como residuo especial o el vertido en un relleno sanitario.

Sin embargo, las aguas residuales contienen una variedad de contaminantes que pueden sobrevivir al tratamiento y permanecer en los biosólidos finales. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un monitoreo periódico de los biosólidos para detectar cualquier contaminación, y regular las tasas de aplicación en función de su contenido de metales pesados, patógenos y nutrientes. A pesar de las regulaciones existentes, se han identificado contaminantes orgánicos en los biosólidos, como los HAPs (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos), etoxilatos de alquilfenol, PBDE (éteres de polibromodifenilo), disruptores endocrinos, dioxinas, ésteres de ftalato y una variedad de microorganismos potencialmente patógenos, entre otros, que a menudo no están regulados. Estos contaminantes que sobreviven después del tratamiento de las aguas residuales y están asociados con los biosólidos tienden a ser difíciles de degradar biológicamente, suelen ser poco solubles en agua, lo que resulta en una alta persistencia y generan modificaciones en las propiedades del suelo.

Frecuentemente, los biosólidos se utilizan como enmienda orgánica (previa autorización) de suelo en entornos agrícolas, contribuyendo así a la fertilidad del suelo. Las tasas de aplicación típicas de biosólidos oscilan entre 2 y 10 toneladas por hectárea por año. Sin embargo, estas tasas pueden estar reguladas dependiendo de la jurisdicción. Por ejemplo, en Ontario, Canadá, los biosólidos están limitados a 8 toneladas de sólidos por hectárea durante un período de 5 años, mientras que, en Alemania, las tasas de aplicación rondan las 5 toneladas por hectárea durante un período de 3 años. Es importante destacar que, si el contenido de metales es elevado, puede haber restricciones adicionales en la cantidad y duración de la aplicación.

Los proyectos de recuperación y/o remediación de suelos también pueden generar grandes volúmenes de suelos contaminados procedentes de sitios municipales e industriales. Por ejemplo, en el caso de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos y otros materiales, los cuales necesitan de una adecuada gestión ambiental para su disposición y/o tratamiento acompañado de un programa de monitoreo ambiental.

Aquí adquiere importancia evaluar el destino de los productos químicos orgánicos en estos biosólidos y suelos para asegurar que no surjan concentraciones excesivas que pueden impactar tanto en la salud como en el ambiente. Esto se puede lograr mediante el uso de modelos de balance de masas con el objetivo de describir el destino de los productos químicos orgánicos en los suelos enmendados para asegurar que los cultivos no se contaminen.

En el caso de las biopilas, es deseable evaluar la tasa de descontaminación con el tiempo e indicar la necesidad de incorporar intervenciones ingenieriles como la ventilación y la adición de nutrientes. Los modelos pueden aplicarse con anticipación para obtener una perspectiva sobre

las tasas de descontaminación, contribuir a restricciones en las tasas de enmienda y ayudar al diseño del sistema de tratamiento con el objeto de hacerlos más efectivos y eficientes.

El modelo químico evaluativo para Suelo Enmendado con Biosólidos (BASL4) se basa en el modelo de Suelo descrito en el capítulo 2 del libro de catedra *Modelos de dispersión y distribución de contaminantes en el ambiente*, y se describirá brevemente aquí. La entrada del modelo incluye las propiedades físico-químicas del producto químico orgánico, especialmente la relación de partición octanol-agua, la solubilidad y la presión de vapor, así como la tasa de biodegradación en el suelo enmendado expresada como una vida media estimada. Las propiedades del suelo incluyen las fracciones de volumen de aire, agua y CO (carbono orgánico).

Los biosólidos pueden aplicarse directamente a una tasa definida en la superficie del suelo y, si se desea, incorporarse al suelo a una profundidad definida mediante arado. Se pueden tratar múltiples capas de suelo. Se establecen ecuaciones diferenciales convencionales de Nivel IV en formato de fugacidad y se resuelven mediante integración numérica para describir el destino del producto químico en el suelo con el tiempo, ya que el producto químico está sujeto a evaporación, reacciones de degradación y transporte por lixiviación.

La difusión y la bioturbación vertical, así como la biodegradación por bacterias y la absorción por parte de organismos edáficos como gusanos y vegetación, también pueden considerarse. El destino del producto químico en el suelo enmendado puede calcularse durante un período de meses y años según sea necesario.

Coulon et al. (2010) han descrito modelos de fugacidad del destino químico, particularmente hidrocarburos presentes en biopilas diseñadas, incluyendo el efecto de la temperatura y extendiéndose al tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos en climas fríos. Se han desarrollado diversos estudios que involucran modelos no basados en fugacidad del destino químico en suelos y biopilas por agencias gubernamentales de los Estados Unidos, especialmente la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés).

El modelo BASL4 está disponible para su descarga desde el sitio web de Trent y en los siguientes apartados procederemos a su presentación.

## Modelo BASL4

El modelo BASL4 está diseñado para modelar sustancias químicas orgánicas tipo 1 (Mackay, 2001), que pueden dividirse apreciablemente en todos los medios. Las propiedades químicas requeridas por el modelo son masa molar, solubilidad en agua, presión de vapor, coeficientes de partición octanol-agua y carbono orgánico-agua y vida media de degradación en el suelo, como se enumera en la Tabla 2.1.

Las concentraciones iniciales del químico en cada capa del compartimento de suelo se requieren en unidades de mg/kg de peso seco del suelo (dw). Se considera que la atmósfera sobre el suelo tiene una concentración química cero, por lo tanto, no hay aportes atmosféricos.

| Name         | CAS       | Molar mass<br>g/mol | Water solubility<br>g/m <sup>3</sup> | Vapor pressure<br>Pa  | K <sub>OC</sub><br>L/kg | log K <sub>OW</sub> | Half-life in soil, days |        |
|--------------|-----------|---------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|--------|
|              |           |                     |                                      |                       |                         |                     | Handbook                | Fitted |
| DDT          | 50-29-3   | 354.5               | 0.0031                               | 0.00002               | $2.4 \times 10^5$       | 6.19                | 3837                    | —      |
| Benzene      | 71-43-2   | 78.1                | 1780                                 | 12700                 | 83                      | 2.13                | 50 <sup>b</sup>         | —      |
| Phenol       | 108-95-2  | 94.1                | 88000                                | 47                    | 30.2                    | 1.46                | 7                       | —      |
| Fenitrothion | 122-14-5  | 277.25              | 30                                   | 0.0054                | 17                      | 3.4                 | 4                       | 20     |
| Diazinon     | 333-41-5  | 304.4               | 60                                   | 0.008                 | 820                     | 3.3                 | 70                      | 30     |
| Dimethoate   | 60-51-5   | 229.28              | 25000                                | 0.0011                | 16                      | 0.8                 | 10                      | 10     |
| DMP          | 131-11-3  | 194.2               | 4000                                 | 0.22                  | 54                      | 2.1                 | 23                      | 3.5    |
| DEP          | 84-66-2   | 222.26              | 1100                                 | 0.133                 | 317                     | 2.4                 | 20                      | 6.5    |
| DBP          | 84-74-2   | 278.35              | 11.2                                 | 0.0019                | $2.2 \times 10^{4a}$    | 4.7                 | 23                      | 8.5    |
| DnOP         | 117-84-0  | 390.56              | 0.0005                               | $1.33 \times 10^{-5}$ | $1.4 \times 10^7$       | 8.1                 | 12                      | 28     |
| OCDD         | 3268-87-9 | 460                 | $7.4 \times 10^{-8}$                 | $1.1 \times 10^{-10}$ | $6.5 \times 10^7$       | 8.2                 | 2300                    | 3650   |

<sup>a</sup>Estimated from K<sub>OW</sub> using the Karickhoff (1981) correlation.

<sup>b</sup>Mackay and Stiver, 1991.

**Tabla 2.2.** *Propiedades fisicoquímicas a 25°C (Mackay et al 2000), acompañadas de sus respectivas vidas medias en suelo.*

El modelo BASL4 simula un suelo que consiste en dos compartimentos de suelo homogéneamente mezclados, definidos por las propiedades enumeradas en la Tabla 2.2. Diferentes composiciones de suelo pueden aplicarse a la primera capa superficial y la segunda más profunda. Cada capa consta de aire, agua, materia orgánica (MO) y materia mineral (MM). Una característica importante y novedosa de este modelo es que la MO se divide en tres fracciones de degradación rápida, lenta y no degradable respectivamente. Se asume que las fracciones volumétricas de aire y agua en los poros de cada capa permanecen constantes durante toda la simulación. La fracción de MO se compone de carbono orgánico (CO) y se requieren las fracciones de masa iniciales de CO de degradación rápida (R) (en inglés) y lenta (L) y sus respectivas vidas medias de degradación ( $T_{1/2-R}$  y  $T_{1/2-L}$ , d). Cualquier fracción restante se considera no degradable.

Es ampliamente aceptado que la MO en el suelo desempeña un papel crítico en la adsorción de contaminantes hidrofóbicos, reduciendo así su disponibilidad para la volatilización, lixiviación y bioacumulación. Cualquier cambio en el contenido de MO probablemente tenga un efecto profundo en el destino químico.

Se considera que la enmienda está constituida por un 100% de materia orgánica (seca), y la concentración química en la enmienda se especifica en unidades de mg/kg de enmienda seca. Aunque en la práctica la mayoría de los biosólidos contienen agua y el lodo líquido puede inyectarse o rociarse sobre el campo.

El modelo asume que, al aplicarse, la capa en la que se aplicó la enmienda se mezcla instantáneamente. Las fracciones volumétricas de agua y aire en el suelo se ajustan inmediatamente para mantenerse consistentes con los valores originalmente definidos por el usuario. Esta simplificación se considera aceptable porque el contenido de agua de los biosólidos y del suelo probablemente se ajusta a un valor común dentro de algunas horas después de la aplicación.

El aumento en la capacidad de retención de agua del suelo con el aumento de la materia orgánica no se aborda. Las profundidades de las capas cambian como resultado de los cambios en la cantidad de materia orgánica presente, pero estos cambios se consideran lo suficientemente pequeños como para que las distancias de difusión permanezcan constantes. Por lo tanto, las tasas de lixiviación y difusión permanecen sin cambios a lo largo de la simulación.

|                                          | Illustrative | <sup>b</sup> Sanchez et al. | <sup>c</sup> Jianlong et al. | <sup>d</sup> McLachlan et al. |
|------------------------------------------|--------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Leaching rate, mm/day                    | 5            | Negligible                  | 5                            | 1                             |
| Bioturbation rate, cm/y <sup>a</sup>     | 0.3          | 0.3                         | 0.3                          | 0.3                           |
| Mass fraction OC in OM                   | 0.56         | 0.57                        | 0.56                         | 0.56                          |
| Fast-degrading OC half-life, days        | 60           | 60                          | 60                           | N/A                           |
| Slow-degrading OC half-life, days        | 360          | 360                         | 360                          | N/A                           |
| Surface layer depth, m                   | 0.1          | 0.1                         | 0.1                          | 0.05                          |
| Surface layer diffusion distance, m      | 0.05         | 0.05                        | 0.05                         | 0.025                         |
| Sub-surface layer depth, m               | 0.4          | 0.1                         | 0.1                          | 0.1                           |
| Sub-surface layer diffusion distance, m  | 0.25         | 0.05                        | 0.05                         | 0.05                          |
| Volume fraction of air                   | 0.2          | 0.2                         | 0.2                          | 0.2                           |
| Volume fraction of water                 | 0.3          | 0.0643 <sup>b</sup>         | 0.3                          | 0.3                           |
| Mass fraction of OC ( $f_{OC}$ ), g/g dw | 0.02         | 0.004 <sup>b</sup>          | 0.0114 <sup>c</sup>          | 0.02 <sup>d</sup>             |
| Fast-degrading fraction of OC            | 0.5          | 0.5                         | 0.5                          | 0                             |
| Slow-degrading fraction of OC            | 0.5          | 0.5                         | 0.5                          | 0                             |
| Non-degrading fraction of OC             | 0            | 0                           | 0                            | 1                             |

<sup>a</sup>McLachlan et al., 2002.

<sup>b</sup>Sanchez et al., 2004.

<sup>c</sup>Jianlong et al., 2004.

<sup>d</sup>MacLachlan et al., 1996.

**Tabla 2.3.** *Propiedades del suelo utilizadas en las simulaciones de BASL4. Todos los valores son estimaciones basadas en Mackay (2001), excepto donde se indique lo contrario. En todos los casos: Área del campo = 1 ha, Grosor de la capa límite de aire = 4.75 mm, Difusividad molecular en el aire = 0.018 m<sup>2</sup>/h, Difusividad molecular en el agua = 1.8×10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/h, Densidad de MO = 1000 kg/m<sup>3</sup>, Densidad de MM = 2500 kg/m<sup>3</sup>, vida media de CO de degradación rápida = 60 días, vida media de CO de degradación lenta = 360 días.*

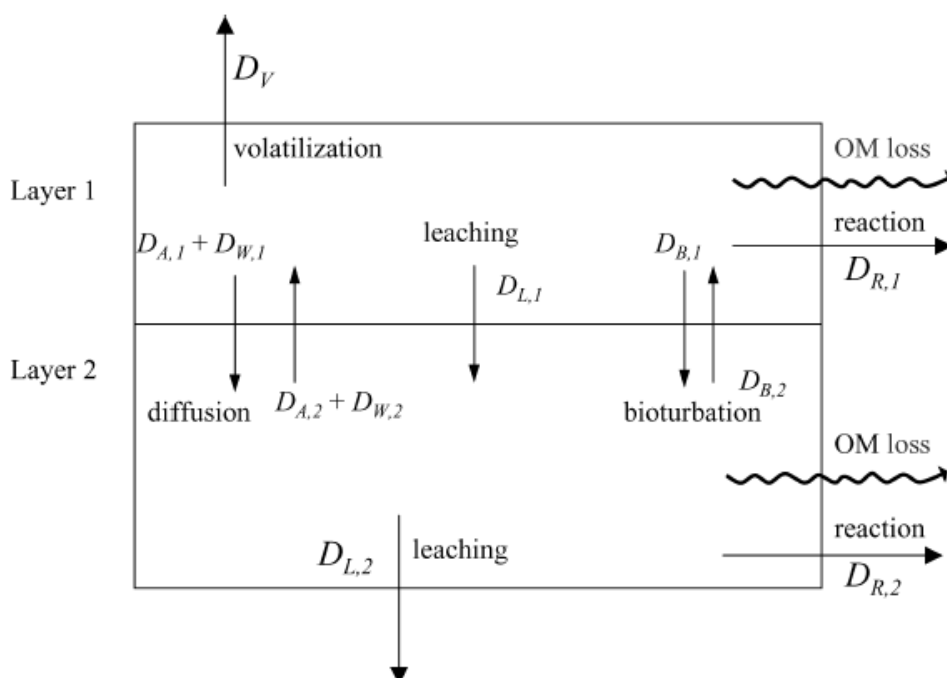
Una limitación del modelo es que no aborda el escurrimiento de productos químicos disueltos en agua o adsorbidos a partículas de suelo. Las tasas de escurrimiento son altamente específicas del tipo de suelo, la pendiente y la cantidad e intensidad de las precipitaciones.

Modelos existentes como PRZM (Modelo de Zona de Raíces de Pesticidas), CREAMS (Productos Químicos, Escurrimiento y Erosión de Sistemas de Gestión Agrícola) o SWRRBWQ (Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales - Calidad del Agua) pueden usarse para predecir las tasas de escurrimiento día a día y se puede estimar una pérdida neta de suelo en intervalos de tiempo deseados. Sugerimos que estas pérdidas se expresen como una constante de tasa promedio y esta cantidad se pueda agregar luego a la constante de tasa de degradación.

Obviamente, en situaciones donde el escurrimiento es el principal proceso de pérdida, es cuestionable si la aplicación de biosólidos es recomendable ya que existe un alto potencial de efectos adversos en las aguas receptoras, como arroyos o ríos cercanos.

## Secuencia de cálculos del modelo

El método de fugacidad (Mackay, 2001) se utiliza para modelar el destino y distribución del producto químico entre las fases. Se deducen los valores de  $Z$  ( $\text{mol m}^{-3} \text{Pa}^{-1}$ ) en todos los medios relevantes y se determinan las fugacidades iniciales de la capa. Se calculan los valores iniciales de transporte y transformación  $D$  ( $\text{mol Pa}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) para la lixiviación, transporte de fase adsorbida (bioturbación) entre las capas, volatilización, difusión en las fases de aire y agua entre las capas, y degradación del producto químico en cada capa (Figura 2.24).



**Figura 2.24:** Procesos de transporte y transformación química en BASL4

Se selecciona un paso de tiempo de integración basado en el tiempo de respuesta característico más corto del transporte y transformación del producto químico, pérdida de MO, y procesos de absorción y eliminación de biota.

El modelo simula una sola temporada de crecimiento. No hay facilidad para cambiar las temperaturas, precipitaciones u otros efectos estacionales. Sin embargo, la acumulación de un año a otro puede estimarse asumiendo que no hay pérdidas durante el invierno o suponiendo, por ejemplo, que las pérdidas durante 6 meses de clima más frío equivalen a 1 mes de condiciones estivales.

Las concentraciones del producto químico en las capas de suelo y las concentraciones de equilibrio en la biota se calculan al final de cada paso de tiempo. El producto químico absorbido por la vegetación u organismos que viven en el suelo no se considera en el balance de masas para el suelo. Los resultados se informan para las condiciones iniciales y periódicamente durante la simulación, en intervalos prescritos.

## Solución de las ecuaciones diferenciales

La solución de las ecuaciones diferenciales se lleva a cabo mediante integración numérica utilizando un paso de tiempo,  $\Delta t$  (h), seleccionado mediante el examen de los tiempos característicos de pérdida química en cada capa, es decir,  $VZ_{T,i} / D_{T,i}$ , así como los tiempos característicos de degradación de la MO y los procesos bióticos cuando corresponda. Cuando se añade una enmienda química o de biosólidos, las masas de químicos ( $M1$  y  $M2$ , mol) y de MO aumentan directamente. Las propiedades del suelo y la distribución química entre las fases se ajustan en consecuencia.

Las masas de MO de rápida y lenta degradación perdidas por degradación se calculan para cada incremento de tiempo  $\Delta t$  como:

$$\Delta m_{i,F} = k_F m_{i,F} \Delta t$$

$$\Delta m_{i,S} = k_S m_{i,S} \Delta t$$

donde las constantes de velocidad  $k_S$  y  $k_F$  ( $h^{-1}$ ) se determinan a partir de las vidas medias de entrada. No hay cambio en la masa de MO no degradable. Los volúmenes de MO de rápida, lenta y no degradable transportados desde cada capa durante un paso de tiempo se calculan usando tres ecuaciones de la forma:

$$\Delta v_{i,j,B} = G_B v_{i,j} \Delta t$$

donde  $\Delta v_{i,j,B}$  es la fracción de volumen en la capa  $i$  del componente degradante  $j$  de la MO y  $G_B$  es la tasa de bioturbación. En términos del cambio en las masas:

$$\Delta m_{i,j,B} = \rho_{OM} G_B v_{i,j} \Delta t$$

donde  $\rho_{OM}$  es la densidad de materia orgánica. La nueva composición del suelo se calcula en cada intervalo.

Las ecuaciones diferenciales finitas para el balance de masas químico se calculan utilizando el método de Euler. Dado que, en general,  $\Delta M_i$  es  $\Delta (V_i Z_{bulk,i}, f_i)$  el cambio en la cantidad química (mol) en cada capa es:

$$\begin{aligned}\Delta M_1 &= ((D_{B,2} + D_{A,2} + D_{W,2})f_2 - D_{T,1}f_1)\Delta t \\ \Delta M_2 &= ((D_{B,1} + D_{A,1} + D_{W,1} + D_{L,1})f_1 - D_{T,2}f_2)\Delta t\end{aligned}$$

a partir de los cuales se calculan las nuevas cantidades químicas en cada capa. Los diversos valores de  $D$  ( $\text{mol Pa}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) son constantes de velocidad de fugacidad según lo descrito por Mackay (2001) de tal manera que cada velocidad es  $Df$  (mol/h). Los subíndices son:

B, bioturbación entre capas;

A, difusión en aire poroso;

W, difusión en agua porosa;

L, lixiviación;

T, la suma de todos los valores de  $D$  que describen la pérdida de la capa incluyendo volatilización desde la capa superficial y reacción de ambas capas como se muestra en la Figura 2.24.

Las nuevas fugacidades de capa se calculan a partir de los nuevos valores de  $VZ_{bulk,i}$  y  $M_i$  donde  $V$  es el volumen total del suelo y  $Z_{bulk,i}$  es el valor de fugacidad total del químico en el suelo. De manera similar,  $Z_{bulk,i}$  y los valores de  $D$  cambiantes se recalculan en cada paso de tiempo. Esto difiere de muchos modelos dinámicos en los que los volúmenes de compartimento, los valores de  $D$  y los valores de  $Z$  permanecen constantes con el tiempo y el cambio en la cantidad de químico se calcula a partir del cambio en la fugacidad.

Las cantidades acumulativas de MO degradada y añadida, así como las pérdidas y adiciones de químicos, se calculan para proporcionar una verificación del balance de masas, es decir, la cantidad inicial más cualquier adición se compara con la suma de la masa remanente en el sistema y las pérdidas acumulativas.

## Ejemplo ilustrativo de aplicación del Modelo BASL4

Para demostrar las características generales del modelo, primero se utiliza el DDT como ejemplo ilustrativo, cuyas propiedades químicas y del suelo utilizadas en las simulaciones se reportan en las Tablas 2.1 y 2.2, respectivamente.

Cabe destacar que el DDT (diclorodifeniltricloroetano) es un plaguicida usado extensamente en el pasado para controlar insectos en cosechas agrícolas e insectos portadores de enfermedades tales como la malaria y el tifus. Actualmente se usa solamente en unos pocos países para controlar la malaria dado que se encuentra prohibido en la mayor parte del mundo.

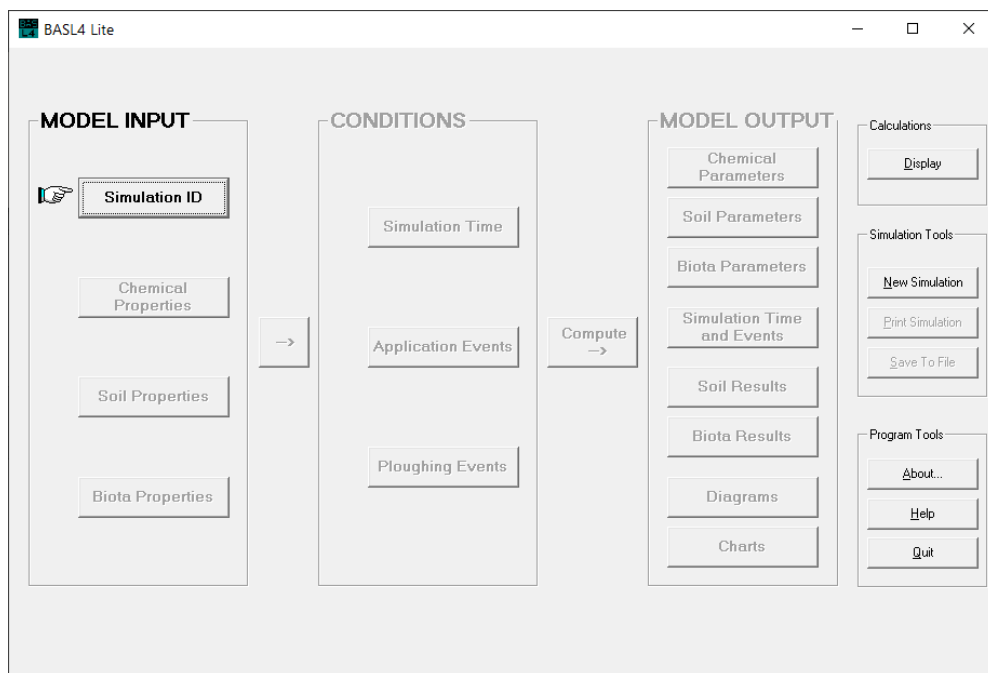
1. Una vez descargado e instalado el modelo, procederemos a abrirlo en este caso utilizaremos la versión desarrollada en Visual Basic del 2.00 versión 2011. Link de descarga:  
<https://www.trentu.ca/cemc/resources-and-models/biosolids-amended-soil-level-iv-basl4-model>.

Figura 2.25

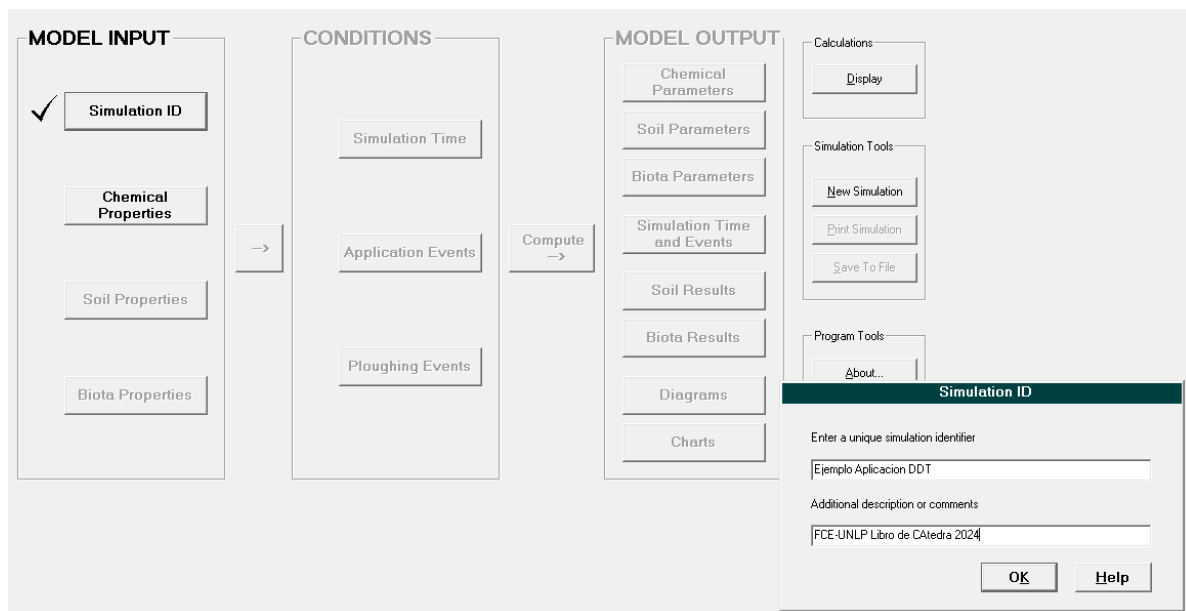


Figura 2.25

- Menú principal para inicio de la simulación se ingresa el título de la misma y un subtítulo opcional. Figuras 2.26 y 2.27.

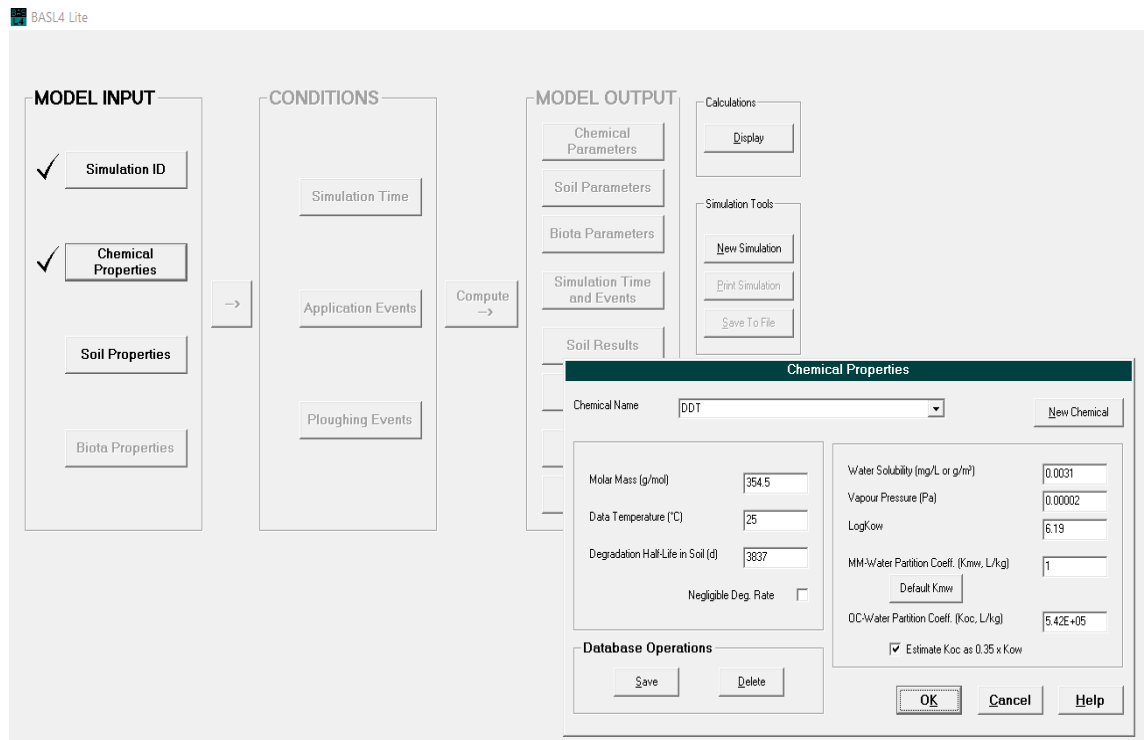


**Figura 2.26.** Menú principal dividido en 3 secciones datos de entrada del modelo condiciones de modelación y datos de salida del mismo junto con un menú de selección para ayuda y herramientas de edición.



**Figuras 2.27.** Título del proyecto y opciones de guardado

3. Selección de contaminante en este caso el DDT y carga de sus propiedades fisicoquímicas a partir de la Tabla 1. Figura 2.28



**Figura 2.28:** como se observa se seleccionó el contaminante DDT, de una lista desplegable con propiedades precargadas, dicha lista viene configurada por defecto en esta versión, pero también puede editarse además de agregar nuevos compuestos.

Aquí encontramos como datos de entrada el peso molecular del compuesto, la temperatura definida para sus constantes de equilibrio, la vida media en suelo, la presión de vapor, solubilidad, Kow y contenido de material mineral (MM) para estimar Koc.

4. Carga de las características del entorno en este caso del tipo de suelo, donde fue seleccionada la opción precargada detallada en la Tabla 2.2. Figura 2.29.

También se pueden agregar nuevos escenarios a modelar para ello es necesario contar con los siguientes datos asociados al tipo de suelo los cuales se agrupan en dos categorías, a saber:

#### 1. Tipo de Suelo

- Dimensiones tanto de la primero como segunda capa de suelo
  - Profundidad de la capa de suelo (m)
  - Distancia de difusión (m)
  - fracción de volumen de aire

- fracción de volumen de agua
- Fracción en Masa de Carbono orgánico (g/g)
  - fracción de rápida degradación
  - fracción de lenta degradación
  - Fracción de Carbono orgánico (CO) en la Materia Orgánica (MO)
- Vidas medias por degradación en el carbono orgánico
  - Carbono Organiza de rápida degradación
  - Carbono orgánico de lenta degradación
- Densidades
  - Agua de poro
  - Aire de poro
  - Materia orgánica
  - Materia mineral

**Soil Properties**

Soil Name: BASL4 Default Soil [New Soil]

|                                       | Surface     | Sub-Surface |
|---------------------------------------|-------------|-------------|
| Soil Layer Depth (m)                  | 0.02        | 0.08        |
| Diffusion Distance (m)                | 0.01        | 0.05        |
| Volume Fraction of Air                | 0.2         | 0.2         |
| Volume Fraction of Water              | 0.3         | 0.3         |
| Mass Fraction of OC (g/g soil solids) | 0.02        | 0.02        |
| Fast-Degrading Fraction (g/g OC) *    | 0           | 0           |
| Slow-Degrading Fraction (g/g OC) *    | 0.5         | 0.5         |
| <b>Bulk Soil Density (kg/m³)</b>      | <b>1487</b> | <b>1487</b> |

\* NOTE: Any remaining OC fraction is considered stable (non-degrading)

**Chemical Transport Parameters**

Fraction OC in OM (g/g): 0.56

OC degradation half-lives (days):

Fast-Degrading OC: 100

Slow-Degrading OC: 2000

**Densities (kg/m³)**

Pore Air: 1.185413

Pore Water: 1000

Organic Matter (OM): 1000

Mineral Matter (MM): 2500

**Database Operations**

Save Delete OK Cancel Help

**Figura 2.29.** Carga de datos para el tipo de suelo.

## 2. Parámetros de transporte del químico. Figura 2.30

- Tasa de lixiviación
- Tasa de escorrentía
- Tasa de erosión
- Tasa de bioturbación
- Espesor de la capa límite del aire
- Difusividad molécula- aire
- Difusividad molécula- agua

**Figura 2.30.** Carga de tasas asociadas a los Parámetro de transporte del compuesto.

## 5. Propiedades de la biota

Se agrupan en tres secciones: raíces de los vegetales (zanahorias), Invertebrados (como gusanos o lombrices) y Pequeños mamíferos (como una musaraña), Figuras 2.31, 2.32 y 2.33, respectivamente.

**Figura 2.31.** Datos de ingreso para las raíces de los vegetales en este caso para las zanahorias donde es necesario definir el volumen, la densidad y las fracciones lipídicas y de agua y la tasa de absorción de misma en (L/día).

| Vegetable Root               |                                    | <b>Invertebrate</b>                     |  | Mammal                             |  |
|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|--|------------------------------------|--|
| <b>Worm</b>                  |                                    |                                         |  |                                    |  |
| Volume (cm <sup>3</sup> )    | <input type="text" value="1"/>     | Volumetric Rates (cm <sup>3</sup> /day) |  |                                    |  |
| Density (g/cm <sup>3</sup> ) | <input type="text" value="1"/>     | Air Respiration                         |  | <input type="text" value="1.2"/>   |  |
| Volume Fractions             |                                    | Water Turnover                          |  | <input type="text" value="100"/>   |  |
| Lipid                        | <input type="text" value="0.012"/> | Diet (soil solids)                      |  | <input type="text" value="1.0"/>   |  |
| Water                        | <input type="text" value="0.80"/>  | Elimination Rate Constants (/day)       |  |                                    |  |
| Efficiencies                 |                                    | Metabolism                              |  | <input type="text" value="0"/>     |  |
| Uptake from Air              | <input type="text" value="0.70"/>  | Reproduction                            |  | <input type="text" value="0.002"/> |  |
| Uptake from Diet             | <input type="text" value="0.10"/>  | Growth Dilution                         |  | <input type="text" value="0.005"/> |  |
| Soil OM Digestion            | <input type="text" value="0.10"/>  |                                         |  |                                    |  |

**Figura 2.32.** Datos de ingreso para invertebrados donde se observan para un gusano o lombriz de tierra es necesario definir el volumen, la densidad, las fracciones de volumen para los lípidos y el agua, la eficiencia en la captación de aire, recambio de agua, composición o contenido de materiales sólidos presentes en un suelo específico (Diet -soil solids-) y las tasas de eliminación por día asociadas al metabolismo la reproducción y la dilución por crecimiento.

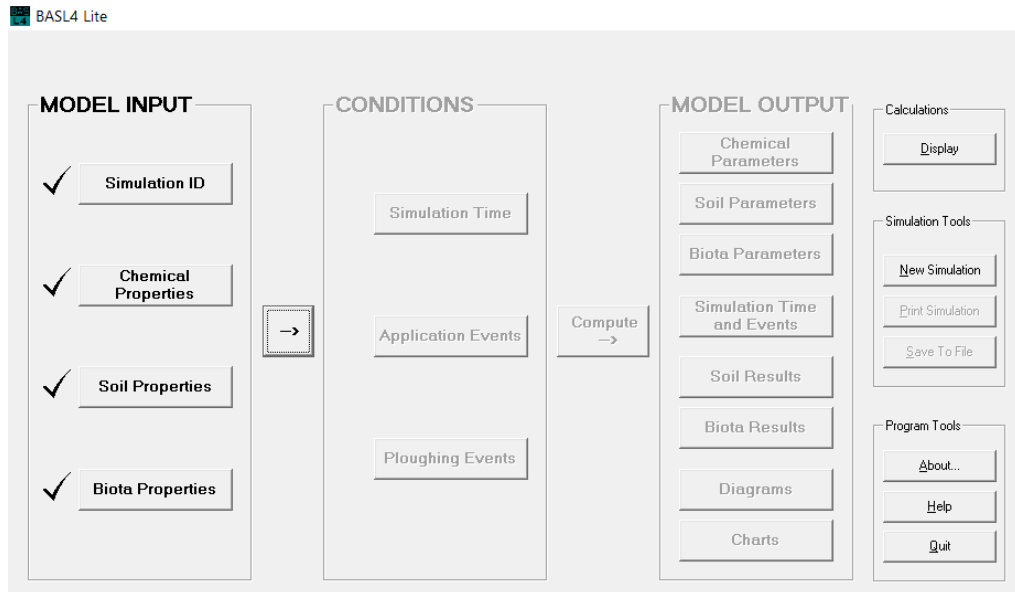
| Vegetable Root               |                                   | <b>Invertebrate</b> |                                   | <b>Mammal</b>                           |                                      |
|------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Shrew</b>                 |                                   |                     |                                   |                                         |                                      |
|                              |                                   | Efficiencies        |                                   | Volumetric Rates (cm <sup>3</sup> /day) |                                      |
| Volume (cm <sup>3</sup> )    | <input type="text" value="10"/>   | Uptake from Air     | <input type="text" value="0.7"/>  | Respiration                             | <input type="text" value="3.4E+04"/> |
| Density (g/cm <sup>3</sup> ) | <input type="text" value="1"/>    | Uptake from Water   | <input type="text" value="0.7"/>  | Water Intake                            | <input type="text" value="5"/>       |
| Volume Fractions             |                                   | Water Absorption    | <input type="text" value="0.85"/> | Worm Tissue Ingestion                   | <input type="text" value="9.1"/>     |
| Lipid                        | <input type="text" value="0.07"/> | Lipid Digestion     | <input type="text" value="0.98"/> | Soil Solids Ingestion                   | <input type="text" value="0.4"/>     |
| Water                        | <input type="text" value="0.70"/> | NLOM Digestion      | <input type="text" value="0.90"/> | Elimination Rate Constants (/day)       |                                      |
|                              |                                   | Soil OM Digestion   | <input type="text" value="0"/>    | Metabolism                              | <input type="text" value="0"/>       |
|                              |                                   |                     |                                   | Reproduction                            | <input type="text" value="0"/>       |
|                              |                                   |                     |                                   | Growth Dilution                         | <input type="text" value="5E-05"/>   |

**Figura 2.33.** Datos de ingresos asociados a un pequeño mamífero, en particular una musaraña, donde es necesario definir el volumen, la densidad, las fracciones de volumen asociadas a los lípidos y el agua, la eficiencia en la captación de aire y agua, la absorción de agua, la digestión de lípidos, la digestión de los sólidos de la materia orgánica y la digestión de los no lípidos, las tasas volumétricas asociadas a la respiración, el agua ingerida la

*ingestión de gusanos y la ingesta de pequeños sólidos del suelo; finalmente se cargan las tasas de eliminación asociadas al metabolismo la reproducción y la difusión por crecimiento.*

## 6. Preparación de Modelación. Definición de las condiciones

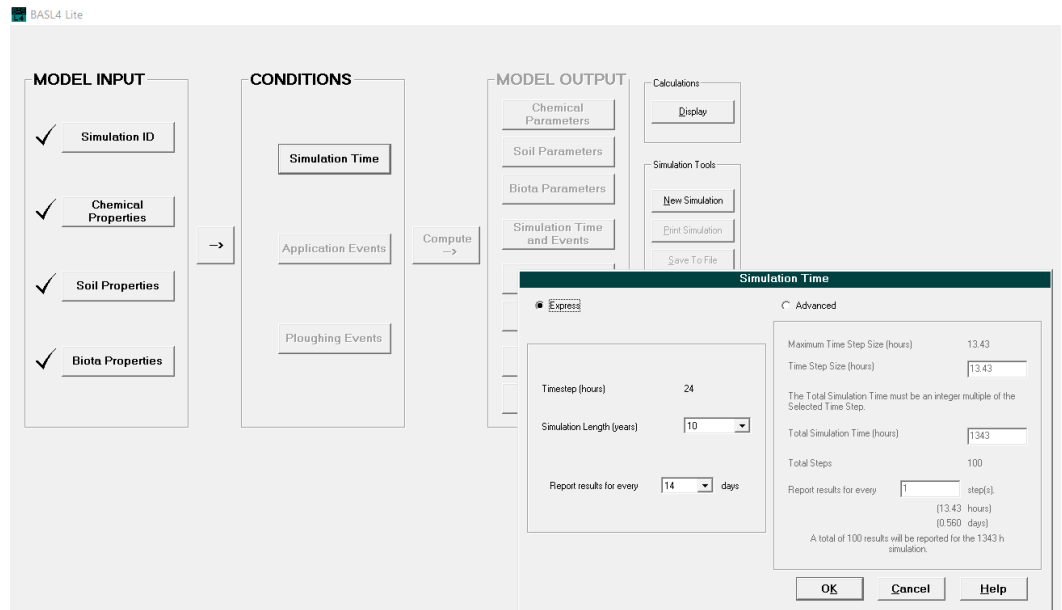
Definidos los datos de entrada del modelo es necesario definir las condiciones de la simulación es decir los tiempos de simulación, los eventos asociados a la aplicación, pero los contaminantes y los eventos asociados al arado del suelo, figura 2.34, a saber:



**Figura 2.34.** Verificación de los datos de entrada y paso al cómputo de los mismos

### ➤ Tiempo de simulación

Donde es necesario definir el paso en horas, la duración de la simulación en años y la frecuencia de reporte de las salidas en este caso 14 días. Figura 2.35



**Figura 2.35**

Además, es posible definir condiciones avanzadas en relación a las variables temporales como pueden ser el tamaño máximo del paso de tiempo en horas, el tamaño del paseo de tiempo total de la simulación el tiempo total de la simulación los pasos totales y la frecuencia para los informes detallados de cada paso.

➤ Eventos de aplicación

Los eventos de aplicación deben ser entendidos como los momentos en los cuales se aplican los biosólidos, o se realiza el riego de aguas residuales en lanfarming o aplicaciones directas de productos como agroquímicos sobre cultivos, o biopilas o suelos a tratar. Figura 2.36

En esta sección será necesario definir las concentraciones de fondo es decir las concentraciones iniciales en el suelo cuyas unidades serán miligramos sobre kilo definidas tanto para la primera capa es decir la superficie del suelo y la segunda capa es decir la Subsuperficial a su vez podemos dividir el ingreso de los contaminantes de 2 maneras: una es por emisión directa al suelo por ejemplo en la aplicación de agroquímicos donde será necesario definir la frecuencia de aplicación es decir la cantidad de veces al año que se aplica y la tasa de aplicación es decir la cantidad de agroquímico por hectárea.

En el caso de aplicaciones de biosólidos será necesario definir la frecuencia de la aplicación es decir la cantidad de veces al año que se aplica y la cantidad asociada en kilogramos por hectárea de suelo además de ser necesario definir los métodos de aplicación es decir si serán superficiales o de infiltración es decir líquidos que a su vez será necesario definir la concentración del químico en dicho líquido.

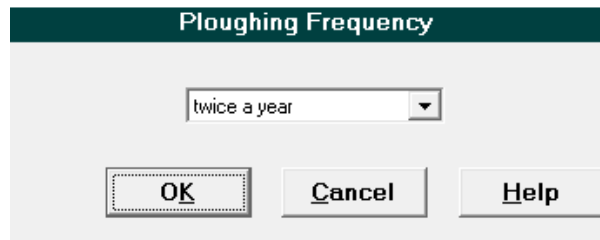
Para los biosólidos se deberá detallar tanto la fracción de carbono orgánico de rápida degradación como la fracción de carbono orgánico de lenta degradación ver figura 2.36.

**Figura 2.36.** Frecuencias de aplicación del químico, arado y concentraciones de fondo.

En este caso al utilizar de ejemplo al DDT se considera una concentración inicial en la superficie del suelo equivalente a un miligramo sobre kilogramo de suelo seco y una concentración en las capas superficiales de 10 miligramos sobre kilogramo de suelo seco a su vez las aplicaciones se definieron para dos eventos al año es decir dos aplicaciones de DDT al año con una tasa de aplicación de 2 kg por hectárea.

#### ➤ Frecuencia de arado

En este apartado es necesario definir la frecuencia anual a la cual el suelo es mezclado verticalmente, figura 2.37 es decir se mezclan tanto la capa superficial como sub- superficial y esto se realiza de manera mecánica a través de un arado de discos cuya imagen representativa se ilustra en la figura 2.38.



**Figura 2.38.** Determinación de la frecuencia de arado, en este caso definida para dos veces al año.

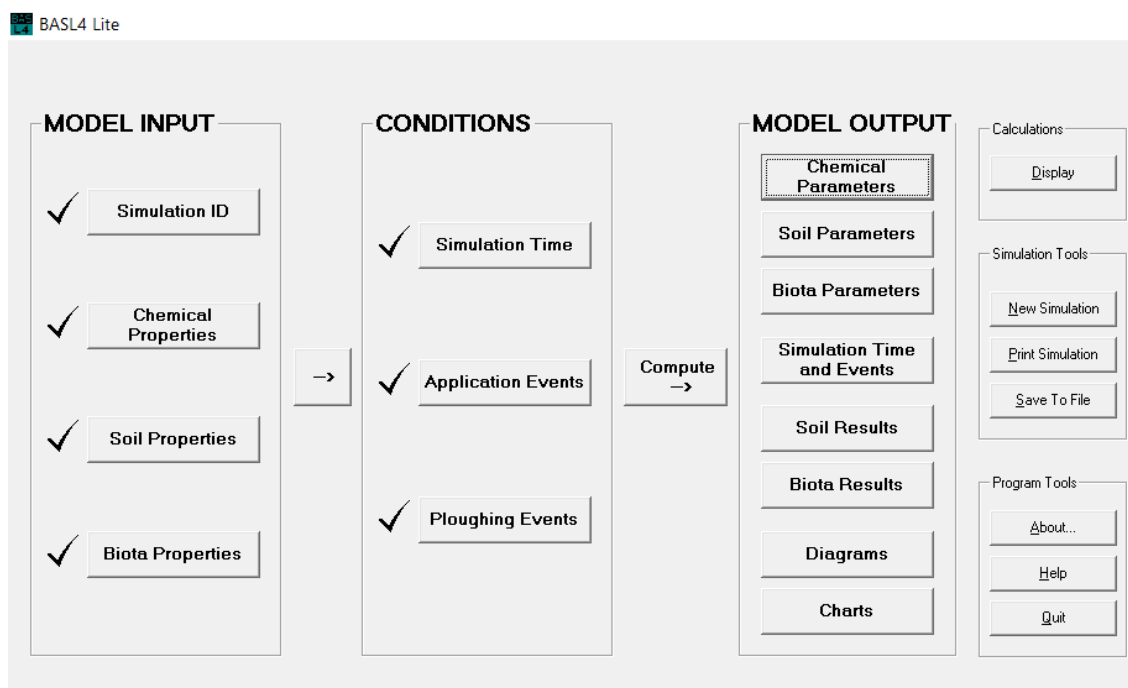


**Figura 2.38.** Arado de la tierra con discos y tractor es un método para labrar la tierra en preparación para la siembra. Consiste en un arado montado en la parte trasera de un tractor, equipado con discos afilados en lugar de rejas o cuchillas tradicionales.

Los discos del arado giran en el suelo mientras el tractor avanza, cortando y volteando la capa superior de la tierra. Este proceso ayuda a desmenuzar los terrones de tierra, romper los residuos de cultivos anteriores y eliminar las malas hierbas. Además, el arado de discos facilita la aireación y la incorporación de fertilizantes o abonos al suelo.

## 7. Cómputo

Finalmente se procede al cómputo de los datos de entrada, haciendo clic en el botón compute figura 2.39, obteniendo las salidas u output observadas dentro del recuadro model output de la figura 2.39



**Figura 2.39.** Salidas del Modelo

En este apartado al igual que en el caso de Cuba sigue encontramos un resumen de las condiciones en las cuales se realizó la modelación es decir los parámetros del químico los parámetros del suelo los parámetros de la biota los tiempos de simulación y los eventos asociados a las lluvias los resultados en suelo los resultados en biota los diagramas y los balances los cuales describiremos a continuación:

## A. Parámetros del compuesto químico. En este caso DDT Figura 2.40

| Chemical Parameters               |                 |                        |              |          |  |
|-----------------------------------|-----------------|------------------------|--------------|----------|--|
| DDT                               |                 |                        |              |          |  |
| Molar Mass                        | 355 g/mol       | Partition Coefficients |              |          |  |
| Data Temperature                  | 25.00 °C 298 K  |                        | imentionless | L/kg     |  |
|                                   |                 | Air-Water (Kaw)        | 9.23E-04     |          |  |
| Water Solubility                  | 3.10E-03 g/m³   | LogKow                 | 6.19         |          |  |
|                                   | 8.74E-06 mol/m³ | Kow                    | 1.55E+06     |          |  |
| Vapour Pressure                   | 2.00E-05 Pa     | OC-Water (Koc) *       | 5.42E+05     | 5.42E+05 |  |
| Vapour Density                    | 2.86E-06 g/m³   | OM-Water (Kom)         | 3.04E+05     | 3.04E+05 |  |
| Henry's Law Constant              | 2.29 Pa·m³/mol  | MM-Water (Kmw)         | 2.50         | 1.00     |  |
| Degradation Half-Life (bulk soil) | 92088 hours     |                        |              |          |  |
|                                   | 3837 days       |                        |              |          |  |

\* Koc is estimated from Kow

Figura 2.40. Parámetros del Químico

## B. Parámetros del suelo, los cuales se dividen en la superficie y la sub superficie donde cada sección se detallará las dimensiones el volumen de las fases las masas de cada fase el carbono orgánico asociado a la degradación tanto rápida como lenta, un inventario total de las emisiones y coeficientes de transporte. Figura 2.41

Soil Parameters

Soil Layer

☒ Layer 1 - Surface

☐ Layer 2 - Subsurface

BASL4 Default Soil

Dimensions...

Phase Volumes

Phase Masses

QC Degradation

Inventory

Transport

Field Area 1.00 ha 10000 m²

| Time  | Depth | Volume | Density | Mass  | Mass     | OC Fraction | OM Fraction |        |
|-------|-------|--------|---------|-------|----------|-------------|-------------|--------|
| h     | d     | m      | m³      | kg/m³ | kg ww    | kg dw       | g/g dw      | g/g dw |
| 0     | 0     | 0.0200 | 200     | 1487  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0200      | 0.0357 |
| 24.00 | 1.00  | 0.0200 | 200     | 1487  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0200      | 0.0357 |
| 336   | 14.00 | 0.0200 | 200     | 1487  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0200      | 0.0356 |
| 672   | 28.00 | 0.0200 | 200     | 1487  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0199      | 0.0355 |
| 1008  | 42.00 | 0.0200 | 200     | 1487  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0199      | 0.0355 |
| 1344  | 56.00 | 0.0200 | 200     | 1487  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0198      | 0.0354 |
| 1680  | 70.00 | 0.0200 | 200     | 1487  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0198      | 0.0353 |
| 2016  | 84.00 | 0.0200 | 200     | 1488  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0197      | 0.0352 |
| 2352  | 98.00 | 0.0200 | 200     | 1488  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0197      | 0.0351 |
| 2688  | 112   | 0.0200 | 200     | 1488  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0196      | 0.0351 |
| 3024  | 126   | 0.0200 | 200     | 1488  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0196      | 0.0350 |
| 3360  | 140   | 0.0200 | 200     | 1488  | 2.97E+05 | 2.37E+05    | 0.0195      | 0.0349 |

Figura 2.41

- C. Parámetros de la biota donde observamos detalles para los vegetales los invertebrados y los mamíferos. Figura 2.42

| Biota Parameters |          |              |                   |        |
|------------------|----------|--------------|-------------------|--------|
| Vegetable Root   |          | Invertebrate |                   | Mammal |
|                  |          |              |                   |        |
| Volume           | 1000     | cm³          | Water Uptake Rate |        |
|                  | 1.00E-03 | m³           |                   |        |
| Density          | 1.00     | g/cm³        | 1.00              | L/day  |
|                  | 1000     | kg/m³        | 4.17E-05          | m³/h   |
| Volume Fractions |          |              |                   |        |
|                  | Lipid    | 0.0250       |                   |        |
|                  | Water    | 0.890        |                   |        |
|                  | NLOM     | 0.0850       |                   |        |

**Figura 2.42**

- D. Tiempo de simulación y eventos: aquí observamos un resumen sobre el tiempo total evaluado la cantidad de días asociada a esa cantidad de horas las concentraciones iniciales del DT en suelo tanto en superficie como en la sub superficie y cada 1 de los eventos discriminados por hora donde fueron calculados las tasas de reparto en función de las tasas de ingreso y los eventos asociados. Figura 2.43

| Simulation Time and Events |            |                            |                                       |                            |                  |                 |                  |                  |
|----------------------------|------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Simulation Times           |            |                            | Initial Concentrations of DDT in Soil |                            |                  |                 |                  |                  |
|                            | hours      | days                       |                                       | mol/m <sup>3</sup>         | g/m <sup>3</sup> | mg/kg ww        | mg/kg dw         |                  |
| Total Time                 | 87600      | 3650                       | Surface                               | 3.35E-03                   | 1.19             | 0.798           | 1.00             |                  |
| Time Step                  | 24.00      | 1.00                       | Deeper                                | 0.0335                     | 11.86            | 7.98            | 10.00            |                  |
| Events                     |            |                            |                                       |                            |                  |                 |                  |                  |
| On Day                     | Time hours | Event Description          | Application Rate kg/ha                | Conc. of Chemical mg/kg dw | Biosolids g/g OC | Non-Deg. g/g OC | Slow-Deg. g/g OC | Fast-Deg. g/g OC |
| 1.00                       | 24.00      | Surface Applied Pure Chemi | -                                     | -                          | -                | -               | -                | 2.00             |
| 1.00                       | 24.00      | Ploughing Event            | -                                     | -                          | -                | -               | -                | -                |
| 182                        | 4368       | Surface Applied Pure Chemi | -                                     | -                          | -                | -               | -                | 2.00             |
| 182                        | 4368       | Ploughing Event            | -                                     | -                          | -                | -               | -                | -                |
| 365                        | 8760       | Surface Applied Pure Chemi | -                                     | -                          | -                | -               | -                | 2.00             |
| 365                        | 8760       | Ploughing Event            | -                                     | -                          | -                | -               | -                | -                |
| 547                        | 13128      | Surface Applied Pure Chemi | -                                     | -                          | -                | -               | -                | 2.00             |
| 547                        | 13128      | Ploughing Event            | -                                     | -                          | -                | -               | -                | -                |

Figura 2.43

- E. Resultados en suelo: aquí obtenemos los resultados en el suelo donde se evalúa la capacidad de la fugacidad en función del tiempo las concentraciones obtenidas las masas totales en inventario los flujos y los coeficientes de fugacidad evaluados, también se evalúan la capacidad de fugacidad tanto para el aire de poro el agua de poro la materia orgánica y la materia mineral nuevamente diferenciado por es por hora. Figura 2.44.

| Soil Results         |                |       |                         |          |                    |                            |          |          |          |
|----------------------|----------------|-------|-------------------------|----------|--------------------|----------------------------|----------|----------|----------|
| DDT                  |                |       |                         |          | BASL4 Default Soil |                            |          |          |          |
| Z, VZ, f             | Concentrations |       | Amounts                 |          | Inventory          |                            | Fluxes   |          | D Values |
| Bulk Soil            |                |       |                         |          |                    |                            |          |          |          |
|                      |                |       | Layer 1 - Surface Layer |          |                    | Layer 2 - Subsurface Layer |          |          |          |
| Time                 |                |       | Bulk Z                  | VZ       | Fugacity           | Bulk Z                     | VZ       | Fugacity |          |
| h d                  |                |       | mol/(m³·Pa)             | mol/Pa   | Pa                 | mol/(m³·Pa)                | mol/Pa   | Pa       |          |
| Z Values mol/(m³·Pa) | 0              | 0     | 5624                    | 1.12E+06 | 5.95E-07           | 5624                       | 4.50E+06 | 5.95E-06 |          |
| Air 4.03E-04         | 24.00          | 1.00  | 5623                    | 1.12E+06 | 5.88E-06           | 5623                       | 4.50E+06 | 5.88E-06 |          |
| Water 0.437          | 336            | 14.00 | 5611                    | 1.12E+06 | 5.86E-06           | 5611                       | 4.49E+06 | 5.88E-06 |          |
| OM 1.33E+05          | 672            | 28.00 | 5599                    | 1.12E+06 | 5.84E-06           | 5599                       | 4.48E+06 | 5.88E-06 |          |
| MM 1.09              | 1008           | 42.00 | 5587                    | 1.12E+06 | 5.81E-06           | 5587                       | 4.47E+06 | 5.88E-06 |          |
|                      | 1344           | 56.00 | 5574                    | 1.11E+06 | 5.79E-06           | 5574                       | 4.46E+06 | 5.88E-06 |          |
|                      | 1680           | 70.00 | 5562                    | 1.11E+06 | 5.76E-06           | 5562                       | 4.45E+06 | 5.88E-06 |          |
|                      | 2016           | 84.00 | 5550                    | 1.11E+06 | 5.74E-06           | 5550                       | 4.43E+06 | 5.88E-06 |          |
|                      | 2352           | 98.00 | 5538                    | 1.11E+06 | 5.72E-06           | 5538                       | 4.42E+06 | 5.88E-06 |          |
|                      | 2688           | 112   | 5526                    | 1.10E+06 | 5.69E-06           | 5526                       | 4.41E+06 | 5.88E-06 |          |
|                      | 3024           | 126   | 5514                    | 1.10E+06 | 5.67E-06           | 5514                       | 4.40E+06 | 5.87E-06 |          |

Figura 2.44

#### F. Resultados en Biota

Aquí observamos los resultados obtenidos para la biota discriminados tanto para vegetales invertebrados y mamíferos donde observamos las determinaciones de la capacidad de fugacidad la fugacidad las concentraciones obtenidas por cada periodo de tiempo los flujos los coeficientes de fugacidad y las características para cada tiempo en la figura 2.45 observamos el detalle de las concentraciones para periodo de tiempo discriminado por tipo.

| Biota Results                                                                                      |             |               |                    |                     |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| DDT                                                                                                |             |               | BASL4 Default Soil |                     |                        |
| Z Values mol/(m <sup>3</sup> Pa)                                                                   | Fugacity Pa | Concentration | Fluxes             | D Values mol/(Pa h) | Characteristic Times h |
| Units<br><input type="radio"/> µg/g wet weight<br><input checked="" type="radio"/> µg/g dry weight |             |               |                    |                     |                        |
| Time                                                                                               | Carrot Root | Invertebrate  | Mammal             |                     |                        |
| h                                                                                                  | d           | Equilibrium   | Steady Stat        | Steady Stat         |                        |
| 0                                                                                                  | 0           | 298           | 111                | 3602                |                        |
| 24.00                                                                                              | 1.00        | 359           | 134                | 4342                |                        |
| 336                                                                                                | 14.00       | 359           | 134                | 4341                |                        |
| 672                                                                                                | 28.00       | 359           | 134                | 4340                |                        |
| 1008                                                                                               | 42.00       | 358           | 134                | 4338                |                        |
| 1344                                                                                               | 56.00       | 358           | 133                | 4337                |                        |
| 1680                                                                                               | 70.00       | 358           | 133                | 4335                |                        |
| 2016                                                                                               | 84.00       | 357           | 133                | 4334                |                        |
| 2352                                                                                               | 98.00       | 357           | 133                | 4332                |                        |
| 2688                                                                                               | 112         | 356           | 133                | 4331                |                        |
| 3024                                                                                               | 126         | 356           | 133                | 4329                |                        |

Figura 2.45

### G. Diagramas finales

En estos diagramas generales observamos un balance realizado para el suelo el reparto de los contaminantes (Figura 2.46), los pequeños invertebrados representado por una lombriz de tierra (Figura 2.47) y la representación de los mamíferos representada por una musaraña (Figura 2.48).

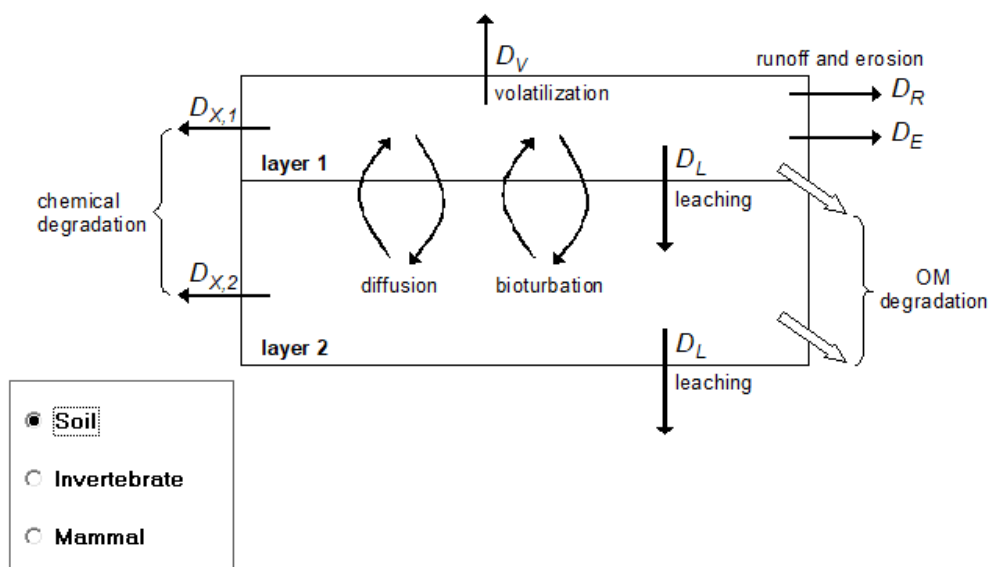
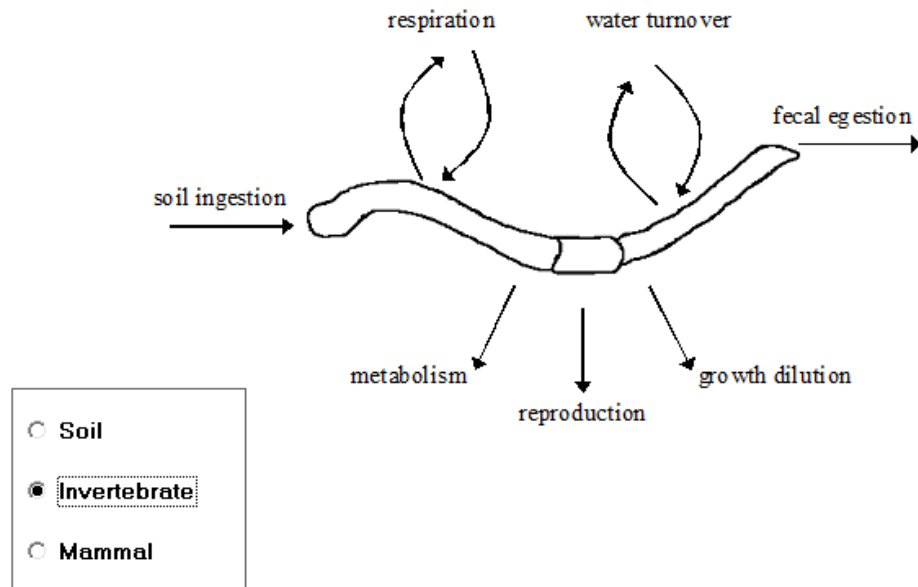
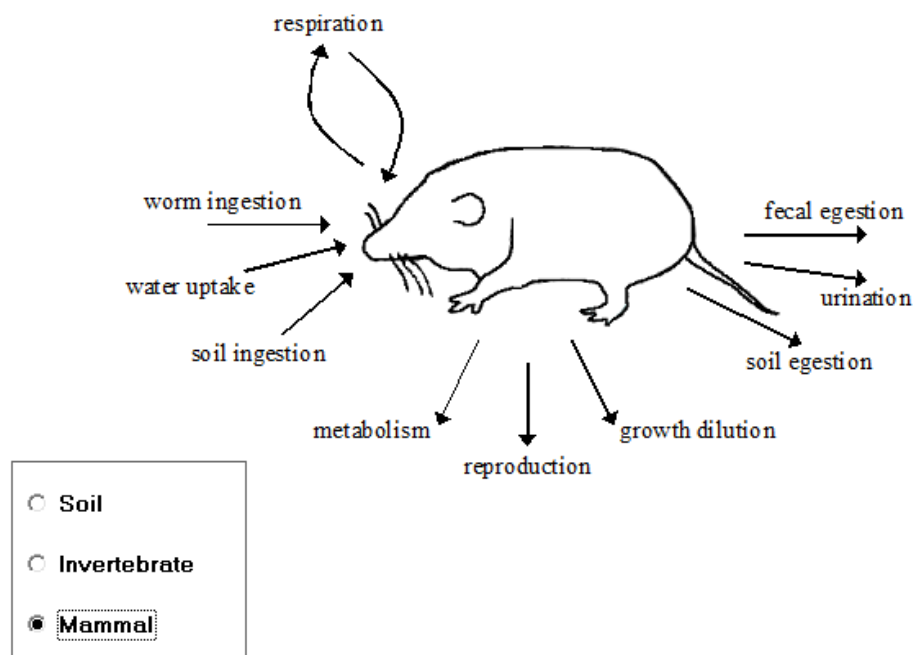


Figura 2.46. Compartimento suelo y evaluación de las raíces de los vegetales.



**Figura 2.47.** Invertebrados donde se representa e identifica las pérdidas por metabolismo, reproducción y de difusión por crecimiento, ingreso y pérdida por respiración e ingreso y pérdida por agua; también el ingreso por ingestión de sólidos y egreso por excretas.

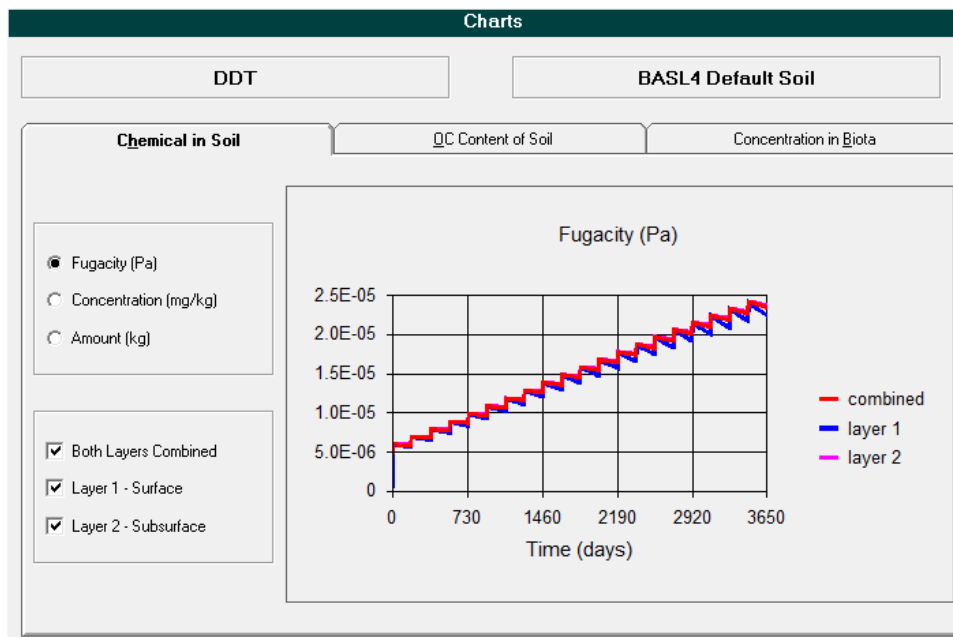


**Figura 2.48.** Pequeño mamífero representado por una musaraña dos observan las tasas de ingreso del contaminante sea por ingestión de los pequeños gusanos, por hidratación o por ingesta de sólidos pero suelo a su vez se representan las pérdidas por metabolismo reproducción y dilución por crecimiento, y los egresos de los contaminantes sea por excretas orina finalmente se contempla también las tasas de ingreso y egreso por respiración, en este último caso para los mamíferos es donde

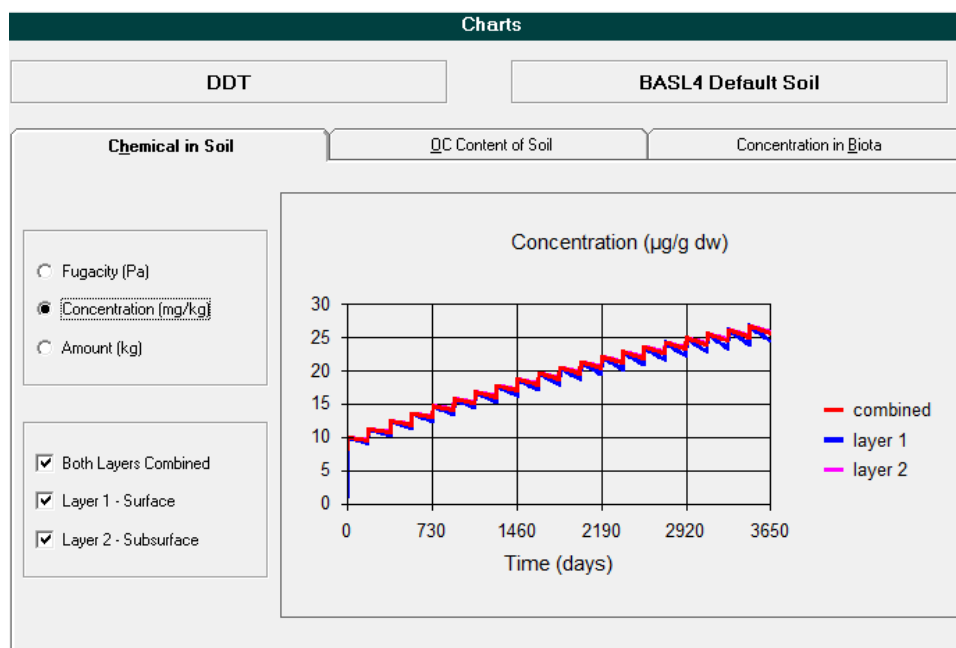
*podemos identificar qué van a suceder los procesos de vida o magnificación dado que se considera la ingesta de gusanos como invertebrados.*

## H. Resultados finales

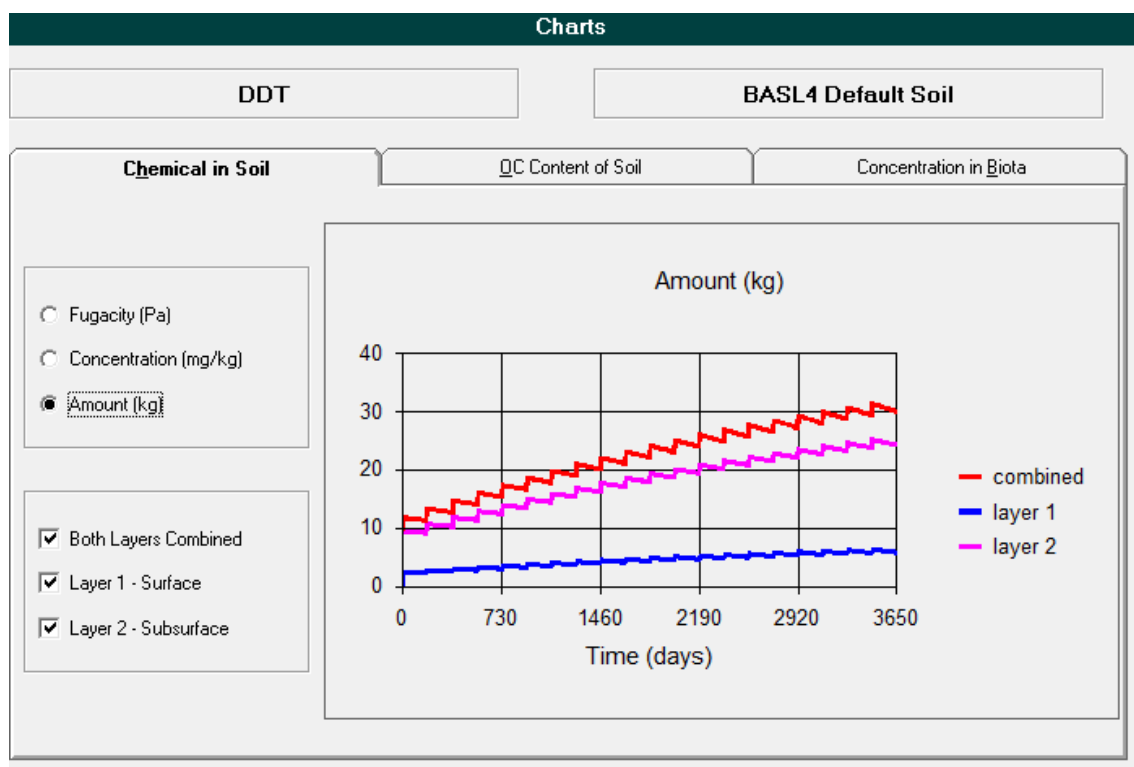
En los balances obtenidos de la modelación observamos 3 secciones una asociada al químico en el suelo, dónde podemos representar en un eje cartesiano la fugacidad, concentración y cantidad en total en kilogramos en función del tiempo, figuras 2.49, 2.50 y 2.51 respectivamente.



**Figura 2.49.** Fugacidad en función del tiempo para un periodo 10 años

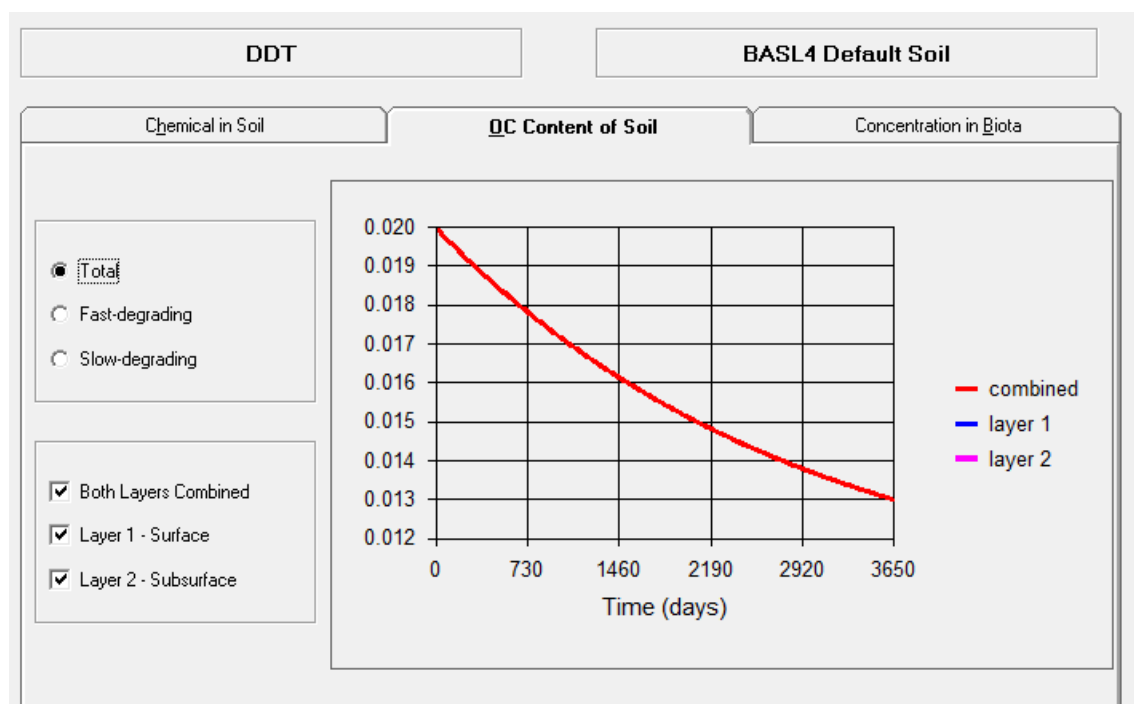


**Figura 2.50.** Concentración en función del tiempo para un periodo de 10 años



**Figura 2.51.** Masa total del contaminante en este caso DT en función del tiempo para un período de 10 años diferenciado entre la cantidad en la superficie y la cantidad en la superficie y finalmente la línea roja el total combinado

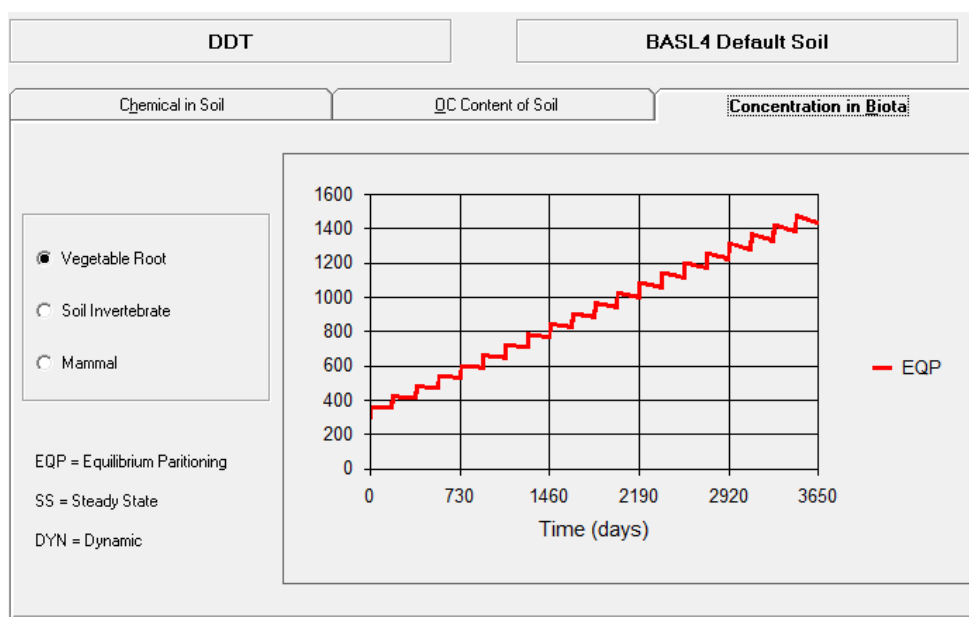
I. Contenido de carbono orgánico en los sólidos. Figura 2.52



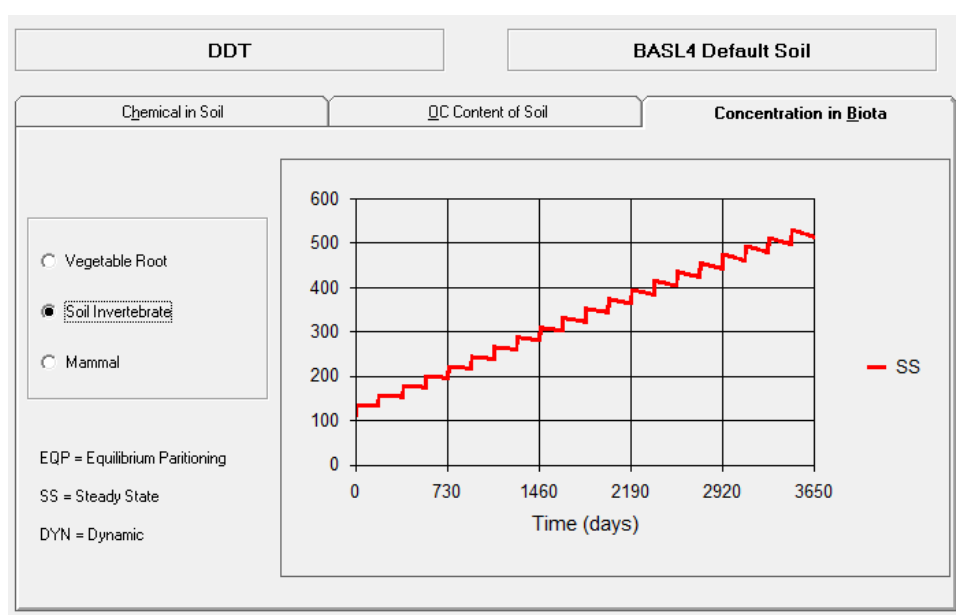
**Figura 2.52.** Concentración de carbono orgánico en función del tiempo para un periodo de 10 años donde se observa en línea Rosa la concentración para la sub

superficie línea azul concentración en la superficie y línea roja concentración combinada en este caso la degradación es contemplando tanto rápida degradación como de la lente degradación en ambos casos la pendiente es negativa lo que se observa que a lo largo del tiempo la cantidad de materia orgánica total irá disminuyendo con el tiempo.

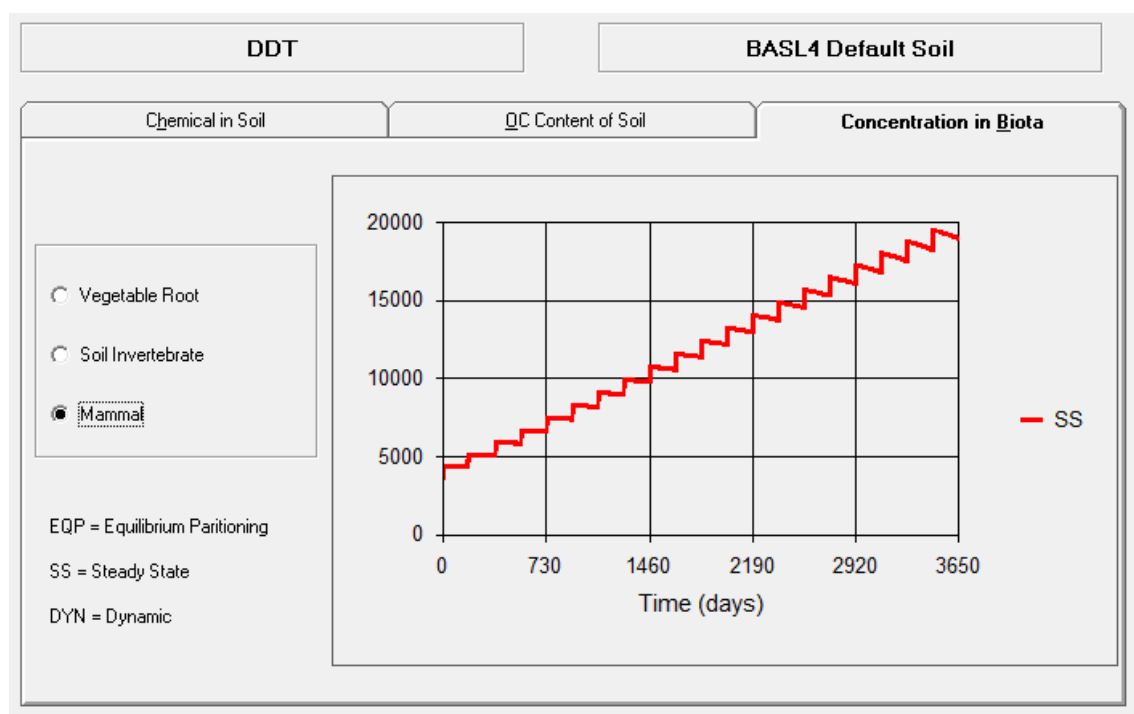
- J. Concentración en la biota. Gráficos diferenciados para las raíces de los vegetales los sólidos en los invertebrados y los mamíferos. Figura 2.53 2.54 y 2.55, respectivamente.



**Figura 53. Concentración en las raíces de los vegetales**



**Figura 2.54. Concentración de sólidos en los invertebrados**



**Figura 2.55.** Concentración en los mamíferos para un periodo de 10 años

En los 3 gráficos puede observarse que las concentraciones totales tienden a aumentar a lo largo del tiempo teniendo en cuenta las aplicaciones que habíamos preestablecido en dos veces al año y la vida media del compuesto DDT es larga alrededor de 3837 días el sistema no logra degradar el total de compuesto motivo por el cual el mismo tiende a acumularse es decir mantener una concentración de fondo hasta una nueva aplicación la cual tiende a incrementarse progresivamente a lo largo del tiempo. Este es el clásico gráfico en serrucho incremental en el cual en cada pico vamos a observar una aplicación luego la misma tiene una pendiente negativa producto de la degradación tanto rápida como lenta y tiende a subir hasta nueva aplicación en este caso a los 6 meses. Esto evidencia la gran persistencia del compuesto.

Además, observamos claramente el proceso de biomagnificación dado que las concentraciones en los mamíferos son sustancialmente más elevadas que los invertebrados.

El modelo BASL4 se considera una herramienta de detección útil para evaluar el destino de los productos químicos presentes en enmiendas de suelo o biosólidos bajo una amplia variedad de condiciones de aplicación. Se diferencia de otros modelos de destino de suelo al incluir el efecto de la degradación de la materia orgánica en el destino de los productos químicos. Se necesitan más datos de campo, incluida una caracterización del suelo más detallada, datos sobre la tasa de degradación de la materia orgánica, tasas de aplicación de lodos y monitoreo a largo

plazo de la concentración en el suelo para validar el modelo. Pero este tiene el potencial de proporcionar una base para estimar las concentraciones en vegetación, invertebrados y pequeños mamíferos presentes en el suelo y así mejorar la evaluación del riesgo asociado con la eliminación de biosólidos en suelos

## Bibliografía

Castagnasso, G., & Massolo, L. (2022). *Modelos de dispersión y distribución de contaminantes en el ambiente*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). Facultad de Ciencias Exactas. ISBN 978-950-34-2160-4.

Massolo, L., & Castagnasso, G. (2015). *Introducción a las herramientas de gestión ambiental*. SEDICI, Universidad Nacional de La Plata.

Hughes, L., & Mackay, D. (2011). Modelo del destino de las sustancias químicas en suelos modificados con lodos con absorción por la vegetación y los organismos que habitan en el suelo. *Contaminación del Suelo y Sedimentos*, 20(8), 938–961.

Hughes, L., Webster, E., & Mackay, D. (2008). Un modelo de nivel de detección evaluativo del destino de los productos químicos orgánicos en suelos modificados con lodos, incluida la degradación de la materia orgánica. *Contaminación del Suelo y Sedimentos*, 17(6), 564–585.

Mackay, D. (2001). *Modelos ambientales multimedia: el enfoque de fugacidad* (2.ª ed., pp. 194–199). Lewis Publishers.

Trent University. (s.f.). *QWASI (Quantitative Water, Air, Sediment Interaction) Model*. <https://www.trentu.ca/cemc/resources-and-models/qwasi-quantitative-water-air-sediment-interaction-model>  
(Consulta: mayo de 2024)

Armitage, J. M., & Gobas, F. A. P. C. (2007). A terrestrial food-chain bioaccumulation model for POPs. *Environmental Science and Technology*, 41(11), 4019–4025.

Hughes, L., & Mackay, D. (2011). Model of the fate of chemicals in sludge-amended soils with uptake in vegetation and soil-dwelling organisms. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 20(8). (Aceptado para publicación en noviembre de 2011).

Hughes, L., Mackay, D., Webster, E., Armitage, J., & Gobas, F. (2005). *Development and application of models of chemical fate in Canada: Modelling the fate of substances in sludge-amended soils* (Informe No. 200502). Trent University, Peterborough, Ontario: CEMN.

## CAPÍTULO 3

# Procesamiento de registros meteorológicos para el modelado y la gestión ambiental

**Resumen:** En este capítulo se hará un desarrollo de los principales parámetros meteorológicos utilizados como insumo en la aplicación en distintos modelos de dispersión de contaminantes y como herramienta para el procesamiento de registros meteorológicos obtenidos en campañas de campo como registros históricos de estaciones fijas. Para ello se presentará el modelo WRPLOT View el cual proporciona una vista de gráficas de rosas de viento, análisis de frecuencias, así como gráficas y tablas para diversos formatos de datos meteorológicos. Se explicará la utilidad, usos y aplicación a un escenario local.

## Introducción

La meteorología es una ciencia que abarca el estudio de los fenómenos atmosféricos y el impacto de este en nuestro entorno. Para comprenderlo y preverlo, los meteorólogos se basan en herramientas y tecnologías especializadas para recopilar, analizar, y visualizar datos meteorológicos de manera efectiva. El software WRPLOT View es una de las herramientas que no solo puede ser utilizada por los meteorólogos sino también para otras disciplinas donde se sea necesario informar, procesar y/o analizar datos meteorológicos para su utilización en estudios ambientales, informar las condiciones del tiempo para distintas locaciones de proyectos, o procesar registros para su uso por otros sistemas como el modelado ambiental.

Este software, ofrece una valiosa funcionalidad para la construcción de Rosas de Viento, un gráfico que representa la distribución de la velocidad y dirección del viento en una ubicación específica durante un período de tiempo determinado. Además, permite realizar análisis de frecuencias y generar visualizaciones que ayudan a los usuarios a comprender mejor los patrones de los registros y las tendencias a largo plazo.

Además, el software WRPLOT View se integra perfectamente con otros instrumentos y tecnologías utilizadas en meteorología, como los pluviómetros para medir la precipitación, los anemómetros para medir la velocidad del viento y los termómetros para medir la temperatura. Esta integración facilita el análisis completo de los datos meteorológicos y la generación de informes más precisos y confiables.

En esta introducción, exploraremos en detalle las características y aplicaciones del software WRPLOT View, identificando las principales variables meteorológicas, los instrumentos para su medida y como estas pueden utilizarse para un adecuado análisis de la información ambiental destacando su importancia como herramienta para la gestión y complementaria para en modelado ambiental.

## La observación del tiempo

La observación y medida de las variables y fenómenos meteorológicos es una condición indispensable para el avance de la Meteorología. Se realizan medidas en miles de estaciones meteorológicas ubicadas sobre tierra firme, pero también sobre el mar y a distintas alturas de la atmósfera, tanto en posiciones fijas y como a lo largo de las rutas trazadas por barcos y aviones, aprovechando que todos ellos disponen de instrumentos meteorológicos a bordo

El uso que puede darse a la información que proporcionan todas estas fuentes de observación es muy variado: desde el mero registro temporal en estaciones concretas, a la elaboración de predicciones meteorológicas. En cualquier caso, los centros meteorológicos centralizan la información por áreas, la procesan, controlan su calidad, y la distribuyen a los usuarios que puedan necesitarla para estudiar la atmósfera.

Se llama parte meteorológico a una comunicación que presenta el resultado de una observación meteorológica. Ésta puede ser verbal o escrita, y puede expresarse en lenguaje ordinario o en clave. Existen multitud de partes meteorológicos, que proporcionan información de distinta naturaleza: SYNOP<sup>1</sup>, SHIP<sup>2</sup>, TEMP<sup>3</sup>, entre otros.

Por supuesto, la base de todas las observaciones reside en los instrumentos meteorológicos que se utilizan para tomar las medidas. En apartados anteriores ya hemos mencionado algunos, pero a modo de resumen conviene recordar Tabla 3.1:

---

<sup>1</sup> SYNOP (Surface Synoptic Observations): Los informes SYNOP son observaciones meteorológicas recopiladas de estaciones de superficie ubicadas en tierra. Estas estaciones miden una variedad de variables meteorológicas, como temperatura, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, visibilidad y tipos de nubes. Estos informes se utilizan para monitorear las condiciones del tiempo en tiempo real y para la elaboración de pronósticos meteorológicos.

<sup>2</sup> SHIP (Ship Observations): Los informes SHIP son observaciones meteorológicas recopiladas por barcos en el océano. Al igual que los informes SYNOP, los informes SHIP incluyen mediciones de variables como temperatura del aire, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, etc. Estos informes son importantes para comprender las condiciones meteorológicas marítimas y para la navegación segura.

<sup>3</sup> EMP (Upper Air Observations): Los informes TEMP son observaciones meteorológicas recopiladas desde globos sonda o a través de aeronaves que realizan mediciones en la atmósfera superior. Estas mediciones incluyen datos como temperatura, humedad, presión y dirección del viento a diferentes altitudes. Los informes TEMP son cruciales para comprender la estructura vertical de la atmósfera y son especialmente importantes para la elaboración de pronósticos a corto y medio plazo.

| Instrumento de medida | Variable meteorológica | Unidades de medida   |
|-----------------------|------------------------|----------------------|
| Termómetro            | Temperatura            | °C                   |
| Barómetro             | Presión atmosférica    | hPa                  |
| Pluviómetro           | Precipitación          | l/m <sup>2</sup>     |
| Higrómetro            | Humedad relativa       | %                    |
| Evaporímetro          | Evaporación            | mm de agua evaporada |
| Anemómetro            | Velocidad del viento   | m/s – km/h           |
| Veleta                | Dirección del viento   | °                    |
| Heliógrafo            | Horas de sol           | h                    |
| Radiómetro            | Radiación              | W/m <sup>2</sup>     |

**Tabla 3.1:** Resumen de las principales variables meteorológicas, sus unidades e instrumental de medida.

## La temperatura

Es de todos conocido que la temperatura es una de las magnitudes más utilizadas para describir el estado de la atmósfera. De hecho, la información meteorológica que aparece en los medios de comunicación casi siempre incluye un apartado dedicado a las temperaturas: sabemos que la temperatura del aire varía entre el día y la noche, entre una estación y otra, y también entre una ubicación geográfica y otra. En invierno puede llegar a estar bajo los 0° C y en verano superar los 40° C. Formalmente, la temperatura es una magnitud relacionada con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia. Cuanta mayor agitación presenten éstas, mayor será la temperatura.

Para medir la temperatura, tenemos que basarnos en propiedades de la materia que se ven alteradas cuando ésta cambia: la resistencia eléctrica de algunos materiales, el volumen de un cuerpo, el color de un objeto, etc. El instrumento que se utiliza para medir la temperatura se llama termómetro y fue inventado por Galileo en 1593. Hay muchos tipos distintos de termómetros. El modelo más sencillo consiste en un tubo graduado de vidrio con un líquido en su interior que puede ser, por ejemplo, alcohol o mercurio. Como estos líquidos se expanden más que el vidrio, cuando aumenta la temperatura, asciende por el tubo y cuando disminuye la temperatura se contrae y desciende por el tubo.

Efectivamente, en Meteorología es muy habitual hablar de temperaturas máximas y mínimas, los valores más altos y más bajos registrados en un periodo de tiempo, por ejemplo, un día. Para medir estas temperaturas extremas se utilizan los denominados termómetros de máxima y mínima:

El termómetro de máxima consta de un termómetro ordinario, cuyo tubo tiene interiormente cerca del depósito una estrangulación: cuando la temperatura sube, la dilatación del mercurio del depósito empuja con suficiente fuerza para vencer la resistencia opuesta por la estrangulación.

## La presión atmosférica

El aire que nos rodea, aunque no lo notemos, pesa y, por tanto, ejerce una fuerza sobre todos los cuerpos debida a la acción de la gravedad. Esta fuerza por unidad de superficie es la denominada *presión atmosférica*, cuya unidad de medida en el Sistema Internacional es el Pascal (1 Pascal = 1N/m<sup>2</sup>).

La presión atmosférica depende de muchas variables, sobre todo de la altitud. Cuanto más arriba en la atmósfera nos encontremos, la cantidad de aire por encima nuestro será menor, lo que hará que también sea menor la presión que éste ejerza sobre un cuerpo ubicado allí. El siguiente gráfico muestra los valores promedio de la presión atmosférica en función de la altitud. En él puede apreciarse cómo la presión atmosférica desciende con la altura, mostrando un decrecimiento aproximadamente exponencial.

## El viento

El viento consiste en el movimiento de aire desde una zona hasta otra. Existen diversas causas que pueden provocar la existencia del viento, pero normalmente se origina cuando entre dos puntos se establece una cierta diferencia de presión o de temperatura.

En el primer caso, cuando entre dos zonas la presión del aire es distinta, éste tiende a moverse desde la zona de alta presión a la zona de baja presión. Algo similar a lo que ocurre dentro de un tubo de pasta de dientes cuando presionamos en un extremo para hacer salir el dentífrico. Al apretar, lo que producimos es una diferencia de presión entre ese punto y el extremo abierto. Los meteorólogos dirían que se ha producido un gradiente o diferencia de presión entre ambos extremos.

En la atmósfera, existe una relación directa entre presión y viento, lo que hace que los mapas de isobaras, que representan los valores de la presión atmosférica, contengan amplia información sobre la velocidad y dirección del viento.

En el caso de que sea una diferencia térmica el origen del viento, lo que ocurre es que cuando una masa de aire adquiere una temperatura superior a la de su entorno, su volumen aumenta, lo cual hace disminuir su densidad. Por efecto de la flotación, la masa de aire caliente ascenderá, y su lugar será ocupado por otras masas de aire, que en su desplazamiento ocasionarán el viento. Las brisas, se producen de esta forma. También éste es el origen de las tormentas estivales y, a mayor escala, de los vientos predominantes en los trópicos.

Para poder disponer de medidas directas de velocidad y dirección del viento, los meteorólogos utilizan distintos instrumentos de medida: a) Medida de la velocidad horizontal del viento: el instrumento más utilizado es el anemómetro de cazoletas (Figura 3.1), en el que el giro de las mismas es proporcional a la velocidad del viento. La unidad de medida es el km/h o el m/s.

Medida de la dirección: para ello se utilizan las veletas, que indican la procedencia geográfica del viento. Hablamos de viento norte, noreste, suroeste, etc. En función de dónde provenga éste.



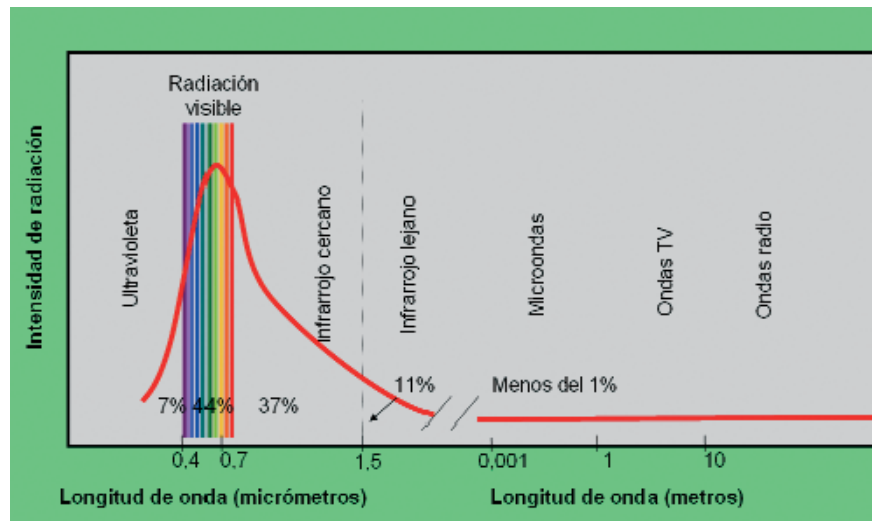
**Figura 3.1:** *Anemómetro de cazoletas.*

Los marineros y pilotos de aviones suelen referirse al viento utilizando los nudos como unidad de medida.

## **La radiación solar**

Cuando un día caluroso de verano nos tumbamos al sol en la playa, notamos cómo nuestro cuerpo se calienta y eleva su temperatura. Lo que ha ocurrido es que los rayos solares, después de atravesar la atmósfera, han calentado nuestro cuerpo. Algo parecido a lo que nos ocurre en esta situación, es lo que le ocurre a la Tierra:

La atmósfera es casi 'transparente' a la radiación solar, pero la superficie terrestre y otros cuerpos situados sobre ella sí la absorben. La energía transferida por el Sol a la Tierra es lo que se conoce como energía radiante o radiación. Esta viaja a través del espacio en forma de ondas que llevan asociada una determinada cantidad de energía. Según lo energéticas que sean estas ondas se clasifican en lo que se conoce como el espectro electromagnético (ver Figura 3.2). Las ondas más energéticas son las correspondientes al rango del ultravioleta, seguidas por la luz visible, infrarroja y así hasta las menos energéticas que corresponden a las ondas de radio.



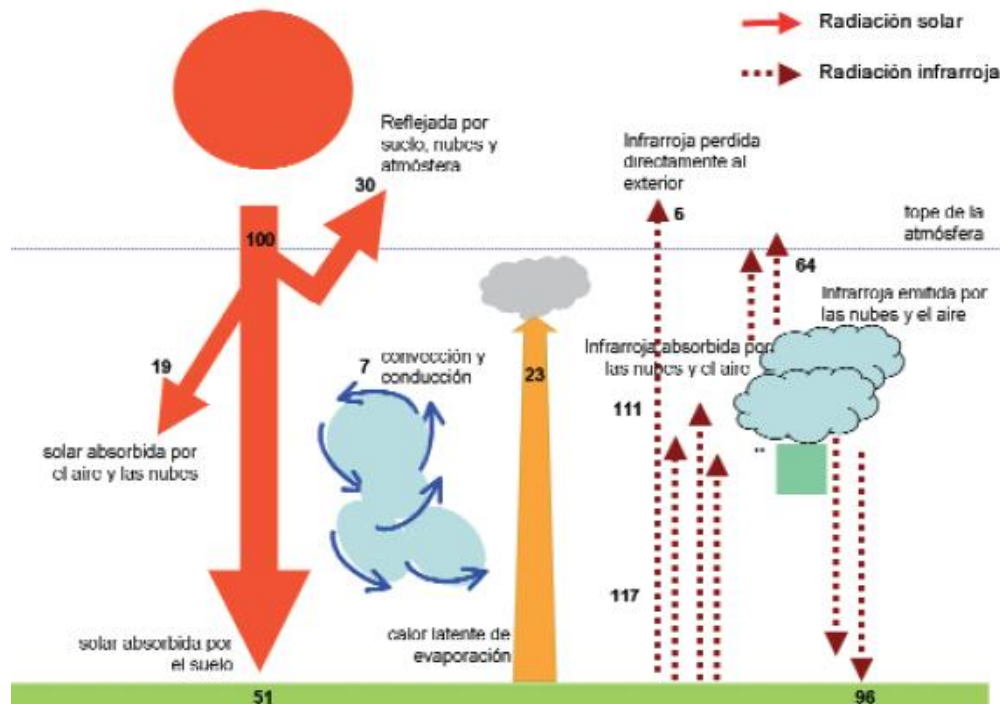
**Figura 3.2:** Espectro electromagnético del Sol.

Todos los cuerpos emiten radiación en función de su temperatura. La ley de Stefan-Boltzmann establece que la energía emitida por un cuerpo (E) es directamente proporcional a la cuarta potencia de su temperatura (T): donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann.

La línea roja continua de la figura 3.2 nos indica la intensidad de la radiación emitida por el Sol para los distintos tipos de ondas electromagnéticas. Como vemos, el Sol, que tiene una temperatura cercana a los 6.000 °K emite fundamentalmente ondas del rango del visible, conocidas habitualmente como *luz* (44%), otra parte está en el rango del ultravioleta (7%) y casi todo el resto es infrarrojo (48%). Sin embargo, nuestro cuerpo, a una temperatura media de unos 37 °C, emite ondas principalmente en el rango del infrarrojo (que no son percibidas por el ojo humano).

La respuesta se encuentra en que a la vez también están absorbiendo cierta cantidad de energía. Si un objeto radia la misma cantidad de energía que la que absorbe, mantiene su temperatura constante (equilibrio radiativo). Así, en nuestro sistema tierra-atmósfera se producen una serie de procesos en los que se absorbe, emite y refleja energía, de manera que el balance final entre la radiación que llega al tope de la atmósfera procedente del Sol y la que sale al espacio exterior, es cero. Es decir que la temperatura anual promedio se mantiene constante. En

la figura 3.3, en se representa esquemáticamente el balance promedio anual de la energía en el sistema tierra-atmósfera.



**Figura 3.3:** Balance radiativo del sistema tierra-atmósfera.

Como vemos, la gran mayoría de la radiación solar (flechas rojas) es absorbida por la superficie terrestre (51%), sólo el 19% de ella es absorbida directamente por los componentes atmosféricos y las nubes y el 30% es reflejada por la superficie, las nubes, y los gases y partículas de la atmósfera, y devuelta al espacio exterior.

La cantidad de radiación solar recibida en un punto se mide mediante un aparato denominado piranómetro. Consiste en un sensor encerrado en un hemisferio transparente que transmite toda la radiación de longitud de onda inferior a  $3 \times 10^{-6}$  metros. Dicho sensor tiene un disco con segmentos blancos y negros alternados que absorben la radiación incidente de modo distinto. El contraste de temperatura entre esos segmentos se calibra en función del flujo de radiación (unidades de  $W/m^2$ ).

## La humedad

El agua es uno de los principales componentes de la atmósfera, en la que puede existir como gas, como líquido, y como sólido. La presencia del agua en los tres estados de agregación se debe a que las condiciones físicas (temperatura y presión) necesarias para que se produzcan dichos cambios de estado se dan normalmente en la atmósfera.

La humedad es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire. Esa cantidad no es constante, sino que dependerá de diversos factores, como si ha llovido recientemente, si estamos cerca del mar, si hay plantas, etc.

Existen diversas maneras de referirnos al contenido de humedad en la atmósfera:

- *Humedad absoluta*: masa de vapor de agua, en gramos, contenida en 1m<sup>3</sup> de aire seco.
- *Humedad específica*: masa de vapor de agua, en gramos, contenida en 1 kg de aire.
- *Razón de mezcla*: masa de vapor de agua, en gramos, que hay en 1 kg de aire seco.

Sin embargo, la medida de humedad que más se utiliza es la denominada **humedad relativa**, que se expresa en tanto por ciento (%) y se calcula según la siguiente expresión:

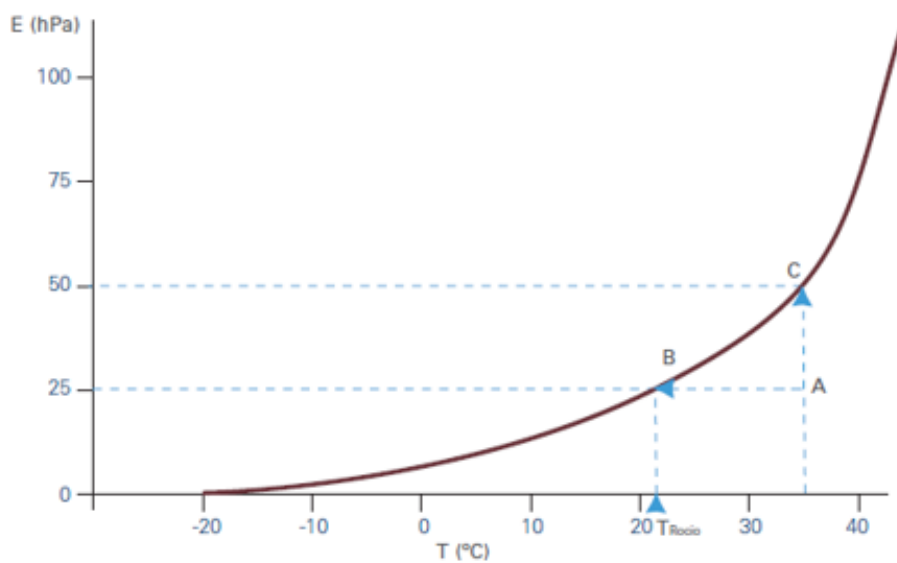
$$h = \frac{e}{E} 100$$

En ella, *e* representa el contenido de vapor de la masa de aire y *E* su máxima capacidad de almacenamiento de éste, llamada *presión de vapor saturante*. Este valor nos indica la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener una masa de aire antes de transformarse en agua líquida (esto es lo que se conoce como *saturación*).

De alguna forma, la humedad relativa nos da una idea de lo cerca que está una masa de aire de alcanzar la saturación. Una humedad relativa del 100% es indicativo de que esa masa de aire ya no puede almacenar más vapor de agua en su seno, y a partir de ese momento, cualquier cantidad extra de vapor se convertirá en agua líquida o en cristaltos de hielo, según las condiciones ambientales.

En la figura 3.4 se representa cómo varía la presión de vapor saturante, *E*, en función de la temperatura, *T*. Vemos que *E* crece exponencialmente con la temperatura.

Esto significa que cuanto más caliente esté una masa de aire, mayor cantidad de vapor de agua se necesitará para llegar a la saturación y empezar a producirse la condensación del vapor sobrante.



**Figura 3.4:** Variación de la presión de vapor saturante,  $E$ , en función de la temperatura,  $T$ .

La humedad se suele medir mediante un instrumento denominado psicrómetro. Este consiste en dos termómetros iguales, uno de los cuales, llamado “termómetro seco”, sirve sencillamente para obtener la temperatura del aire. El otro, llamado “termómetro húmedo”, tiene el depósito recubierto con una telilla humedecida por medio de una mecha que la pone en contacto con un depósito de agua. El funcionamiento es muy sencillo: el agua que empapa la telilla se evapora y para ello toma el calor del aire que le rodea, cuya temperatura comienza a bajar.

Dependiendo de la temperatura y el contenido inicial de vapor de la masa de aire, la cantidad de agua evaporada será mayor o menor y en la misma medida se producirá un mayor o menor descenso de temperatura del termómetro húmedo. En función de estos dos valores se calcula la humedad relativa mediante una fórmula matemática que las relaciona. Para mayor comodidad, con el termómetro se suministran unas tablas de doble entrada que dan directamente el valor de la humedad relativa a partir de las temperaturas de los dos termómetros, sin tener que realizar ningún cálculo.

## La precipitación

Una nube puede estar formada por una gran cantidad de gotitas minúsculas y cristalitos de hielo, procedentes del cambio de estado del vapor de agua de una masa de aire que, al ascender en la atmósfera, se enfría hasta llegar a la saturación.

Lo que hemos hecho no es ni más ni menos que reproducir las condiciones ambientales para la formación de una nube. Tirando del globo hemos hecho disminuir la presión dentro del

tarro hasta que ésta alcance el valor que hace que el aire se sature y condense a la temperatura a la que estamos. Poniendo el humo en el tarro, hemos proporcionado pequeñas partículas sobre las que se origina más fácilmente la condensación.

En la realidad, para que el vapor existente en una masa de aire que alcanza la saturación pueda condensarse en forma de gotitas es preciso que se cumplan dos condiciones: la primera es que la masa de aire se haya *enfriado lo suficiente*, y la segunda es que existan en el aire *núcleos de condensación* (denominados núcleos higroscópicos) sobre los que puedan formarse gotitas de agua.

Las minúsculas gotitas que forman la nube y que se encuentran en suspensión dentro de ella gracias a la existencia de corrientes ascendentes, empezarán a crecer a expensas de otras gotitas que encuentran en su caída. Sobre cada gotita actúan fundamentalmente dos fuerzas: la debida al arrastre que la corriente de aire ascendente ejerce sobre ella, y el peso de la gotita.

El instrumento que se suele utilizar para medir la precipitación caída en un lugar y durante un tiempo determinado se denomina pluviómetro.

$$V = H \times S$$

$$\text{Siendo } H = 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m y } S = 1 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, sustituyendo los valores de H y S obtenemos:

$$V = 1 \text{ m}^2 \times 10^{-3} \text{ m} = 10^{-3} \text{ m}^3 = 1 \text{ Litro}$$

Identificadas las principales variables meteorológicas y los instrumentos para sus determinaciones repasaremos algunos concetos relacionados con las Estaciones Meteorológicas.

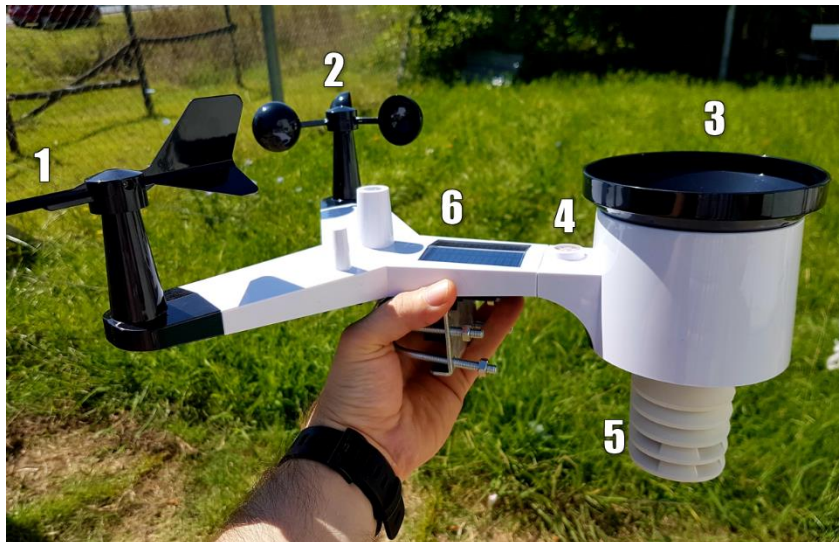
## Estación meteorológica

Una estación meteorológica normalmente dispone de varios de los instrumentos anteriormente nombrados, incluso todos si es muy completa. Como mencionábamos antes, para que las medidas estén bien tomadas, la ubicación, orientación y condiciones del entorno de los aparatos necesitan atenerse a las normas que la Organización Meteorológica Mundial ha establecido. Para que los datos sean rigurosos, en el recinto de una estación meteorológica debe disponer de una garita, una especie de jaula de madera blanca situada a 1.5 m del suelo, dentro de la cual se ubican los termómetros, el higrómetro y el evaporímetro, como el de la figura N°3.5.



*Figura N° 3.5: "Refugios o abrigo meteorológico para los instrumentos, como el que se muestra aquí, sirven como un lugar sombreado para los termómetros. Los termómetros dentro de los refugios miden la temperatura del aire; mientras que los termómetros expuestos directamente al sol no lo hacen".*

Además, en muchos casos, las estaciones disponen de una torre meteorológica. Sobre ésta se sitúan aparatos de medida como termómetros, anemómetros y veletas, que nos informan sobre las condiciones meteorológicas a distintas alturas.



**Figura N° 3.6:** se observa una estación meteorológica automática de uso comercial, cuyos registros se transmiten automáticamente a un receptor situado en un rango de 100 m., información enviada mediante pulso de onda de radio de frecuencia ajustable y almacenados en

*el mismo receptor para un posterior análisis mediante un computador. Ref.: cortesía Castagnasso Germán.*

Detalles: 1: Veleta – 2: Anemómetro – 3: Pluviómetro – 4: Radiómetro – 5: Abrigo, Termómetro – Higrómetro – 6: Placa solar para recarga de baterías.

Además de las observaciones instrumentales, existen otras variables que se miden subjetivamente por observadores especializados como la cantidad y tipo de nubes, oleaje, etc.

## **Los satélites meteorológicos**

Sin lugar a dudas, los satélites meteorológicos son los sistemas de observación más complejos en la actualidad. La posición que ocupan, en órbita alrededor de la Tierra, les permite tener una visión privilegiada, mucho más amplia y de conjunto que la de cualquier aparato situado en la superficie terrestre.

Los satélites reciben la radiación electromagnética que emite y refleja la Tierra. La primera proviene de ella misma y la segunda proviene del Sol, pero se refleja en la superficie terrestre y en la atmósfera antes de alcanzar el satélite. Los satélites captan determinadas frecuencias de esta radiación, de distinta intensidad dependiendo de las condiciones atmosféricas, para posteriormente procesar los datos y elaborar las imágenes que se recibirán en las estaciones de tierra, donde serán interpretadas.

Los satélites meteorológicos pueden clasificarse en función de la órbita sobre la que se sitúan, como a continuación se detalla. Las características y ventajas de los dos tipos principales son las siguientes:

## **Satélites geoestacionarios**

La satélite gira en sintonía con el planeta Tierra, encontrándose fijo en un punto situado sobre el ecuador terrestre. La distancia que le separa del centro de la Tierra es muy grande, unos 40.000km (6.6 veces el radio terrestre).

Al estar tan alejados, su campo de visión es muy extenso (una cara completa del Planeta). Además, proporcionan información continuada sobre una amplia zona, permitiendo el estudio de la evolución atmosférica en ella.



**Figura 3.7:** *Satélite METEOSAT<sup>4</sup> e imagen infrarroja realzada en color. FUENTE: EUMETSAT. Además de su utilidad en meteorología y climatología, los datos del satélite METEOSAT también se utilizan en una variedad de aplicaciones, como la agricultura, la gestión de desastres, la navegación marítima y la aviación.*

## Satélites polares

La satélite órbita alrededor de la Tierra sobre una órbita mucho más baja (entre 100 y 2000 km de altura).

La cercanía a la Tierra permite gran resolución espacial. Además, pueden observarse zonas distintas a lo largo de su trayectoria.

Un satélite meteorológico cuenta con la instrumentación adecuada para captar información acerca de diversas propiedades del planeta Tierra, pero principalmente capta la radiación electromagnética de tipo visible e infrarrojo. A partir de esta información se elaboran dos tipos de imágenes de satélite, que reciben el nombre de la banda del espectro a la que corresponden. Si las imágenes recibidas se colocan unas tras otras, visualizándose como secuencia, podremos apreciar los movimientos de las nubes, tal y como el hombre del tiempo nos muestra a diario en televisión.

### Imágenes visibles (VIS)

- Las imágenes visibles constituyen una imagen muy similar a la que percibiríamos si nos situásemos sobre el satélite, puesto que, al igual que harían nuestros ojos, el satélite capta la radiación solar tras reflejarse sobre las nubes, la tierra o el mar, dependiendo de la zona.
- El brillo de la imagen depende de tres factores: la intensidad de la radiación solar, el ángulo de elevación del sol y la reflectividad del cuerpo observado. La reflectividad

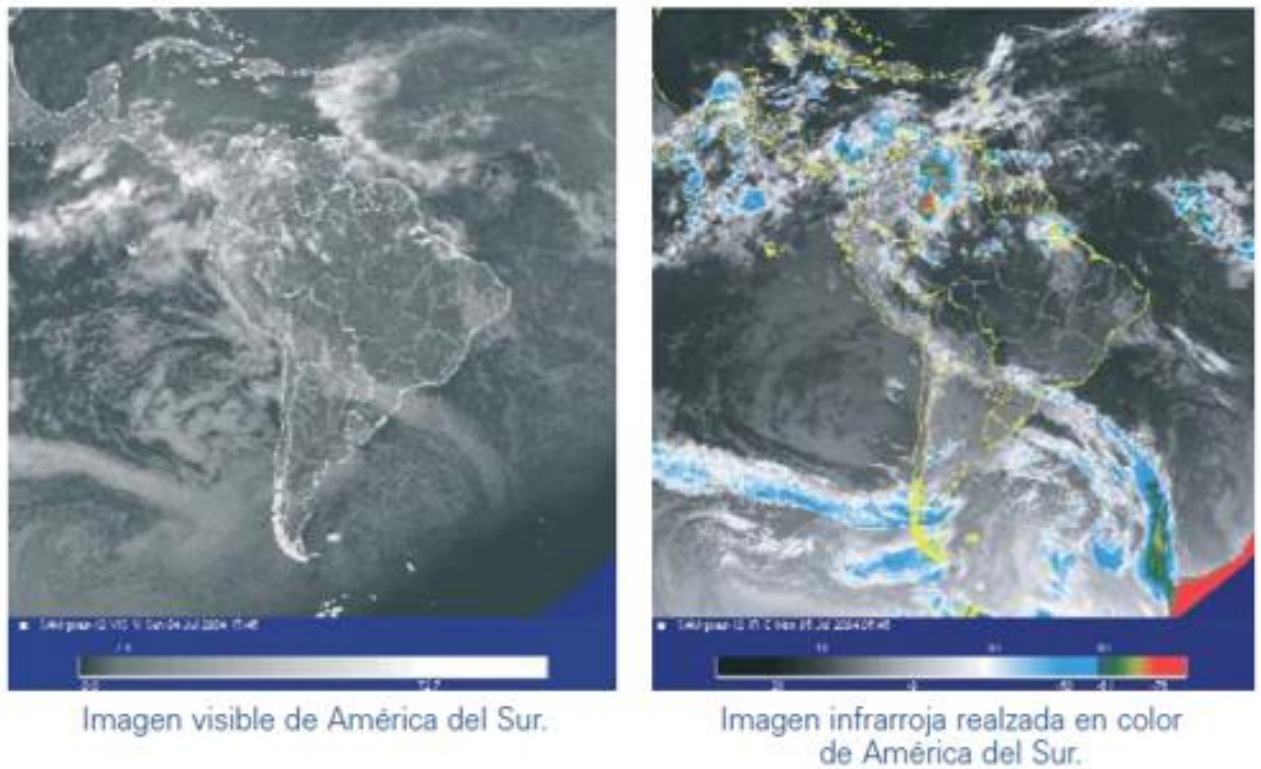
<sup>4</sup> El satélite METEOSAT es una serie de satélites meteorológicos operados por la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT).

promedio (o albedo) del sistema Tierra-Atmósfera es del 30%, pero, tal y como vimos en el capítulo anterior, la nieve y algunas nubes son capaces de reflejar una gran cantidad de luz, por lo que en una imagen de satélite visible aparecerían más brillantes que, por ejemplo, el mar.

- Aunque las nubes en general son buenos reflectores, su albedo depende del espesor y de la naturaleza de las partículas que las constituyen. Un cirro, por ejemplo, al ser una nube fina formada por cristallitos de hielo, apenas refleja la radiación solar, por lo que es difícil apreciarla en una imagen visible (son casi transparentes).

### **Imágenes infrarrojas (IR)**

- La intensidad de la radiación infrarroja que emite un cuerpo está relacionada directamente con su temperatura. Así, una nube alta y fría, como puede ser un cirro, aparecerá muy brillante en una imagen de este tipo. El desierto a mediodía, si no hay nubes por encima de él, se verá como una zona muy oscura en la imagen, debido a su elevada temperatura. Las imágenes infrarrojas se pueden realzar en color en función de la temperatura de emisión de la zona, facilitándose así la identificación de zonas muy frías, normalmente correspondientes a cimas de nubes de mucho desarrollo.
- Las imágenes IR impiden distinguir bien las nubes bajas y las nieblas, puesto que como su temperatura es parecida a la de la superficie donde se encuentran, podrían confundirse con ésta.
- Las imágenes IR impiden distinguir bien las nubes bajas y las nieblas, puesto que como su temperatura es parecida a la de la superficie donde se encuentran, podrían confundirse con ésta.



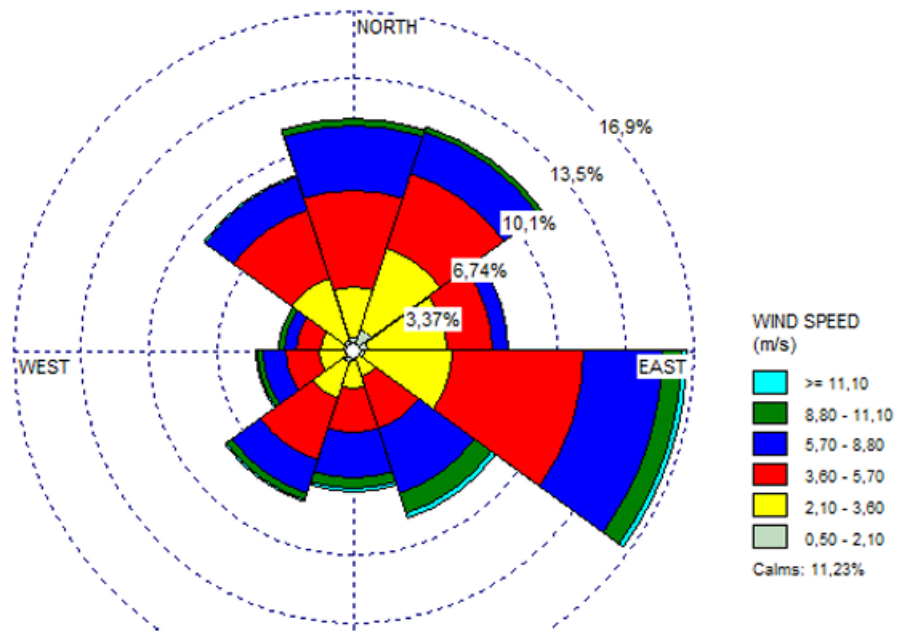
**Figura 3.8:** Fuente *National Oceanic and Atmospheric Administration*

### **Registro y observación de variables meteorológicas (variables a registrar)**

- Temperatura: Se registra el valor en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) utilizando un termómetro.
- Humedad: Se indica la humedad relativa en porcentaje (%) si se dispone de un higrómetro.
- Presión: Se utiliza un barómetro para registrar si la presión atmosférica está aumentando, disminuyendo o permanece estacionaria.
- Viento: Se registra la intensidad del viento clasificándola como débil, moderada o fuerte, y se indica la dirección utilizando una veleta.
- Precipitación: Se utiliza un pluviómetro para medir la cantidad de agua caída acumulada en las últimas 24 horas, expresada en litros por metro cuadrado ( $\text{l/m}^2$ ).
- Nubosidad: Se describe el estado del cielo como despejado, parcialmente nublado o completamente cubierto.

## Ejemplo ilustrativo de aplicación del WRPLOT View Freeware

El software WRPLOT View es un software gratuito para la construcción de Rosas de Viento para datos meteorológicos. Proporciona una vista de gráficas de rosas de viento, análisis de frecuencias, así como gráficas para diversos formatos de datos meteorológicos. Figura 3.9



**Figura 3.9.** Esquema de rosas de Viento procesada por WRPLOT View para la región de Mar del Plata Buenos Aires Argentina periodo 2017

Las rosas de los vientos se utilizan para representar gráficamente la dirección de transporte dominante de los vientos en un área. Debido a las influencias del terreno local, los posibles efectos costeros, la exposición de los instrumentos y la variabilidad temporal del viento, es posible que las estadísticas de la rosa de los vientos no siempre sean representativas del transporte real para un área. Otras condiciones meteorológicas también pueden ser importantes para determinar la formación y el transporte de ciertos contaminantes atmosféricos, en particular los contaminantes reactivos.

## **Descarga e instalación**

### **Pasos para la instalación**

1. Descargar el archivo de instalación de la dirección:  
<http://www.weblakes.com/products/WRPLOT View/>
2. Llenar el formato de registro para obtener el código de activación (Figura 3.10).
3. Instalar el WRPLOT View en tu computadora (Figura 3.11).
4. Una vez obtenido el código de activación, iniciar el WRPLOT View (Figura 3.12).
5. Ingresar código de activación.

6. A partir de este momento se puede empezar a usar el WRPLOT View (Figura4).

**Lakes Software**

COMERCIO

SOFTWARE DE LAGOS PRODUCTOS DE SOFTWARE SERVICIOS DATOS OBTENIDOS CAPACITACIÓN APOYO

## WRPLOT VER REGISTRO

Gráficos de rosa de los vientos para datos meteorológicos

DESCRIPCIÓN GENERAL  
CARACTERÍSTICAS  
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS  
RECURSOS  
APOYO

### REGISTRO Y ACTIVACIÓN

#### Registro y Activación

Para registrar su software **WRPLOT View** y recibir su **código de activación** por correo electrónico, complete el formulario de registro a continuación.

#### Información del contacto

Nombre de pila: \*

Apellido: \*

Correo electrónico: \*

Confirmar correo electrónico: \*<sup>1</sup>

Compañía: \*

DIRECCIÓN:

Ciudad:

Provincia del estado: \*

País: \*

Código Postal:

Código de seguridad: \*

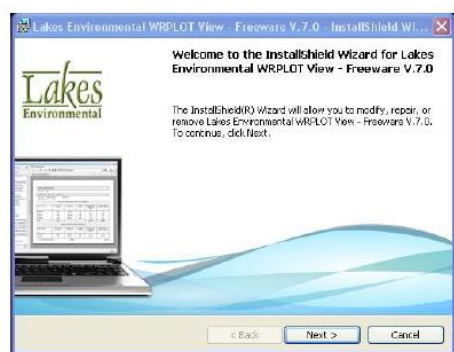
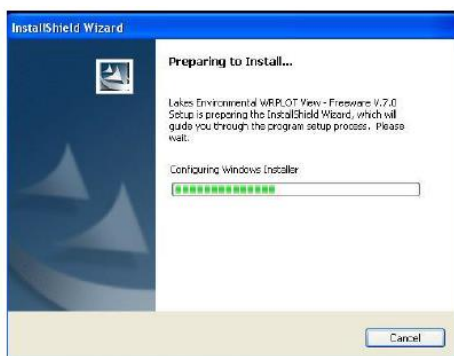
Ingrese el código de seguridad de la imagen a continuación:

**638710**

\* Campo requerido  
<sup>1</sup> Se requiere una dirección de correo electrónico válida

#### Código de activación

**Figura 3.10.** Registro y activación del modelo WRPLOT View

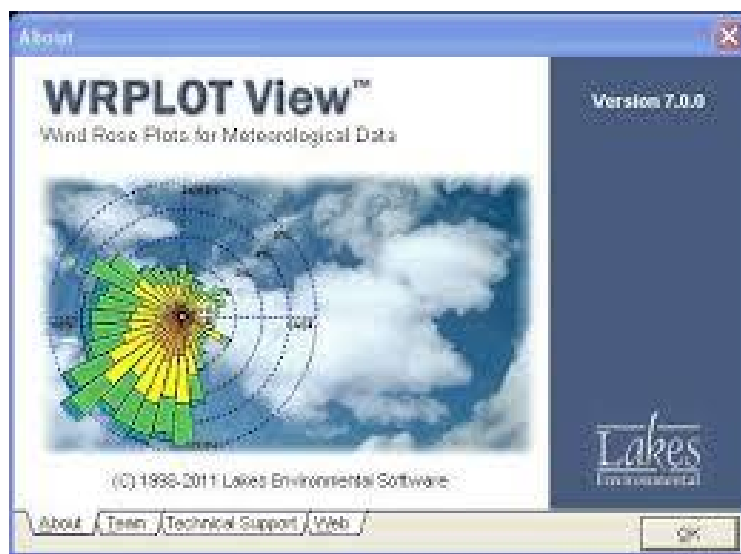


**Figura 3.11** Proceso de Instalación



**Figura 3.12.** ventanas durante la instalación del WRPLOT View

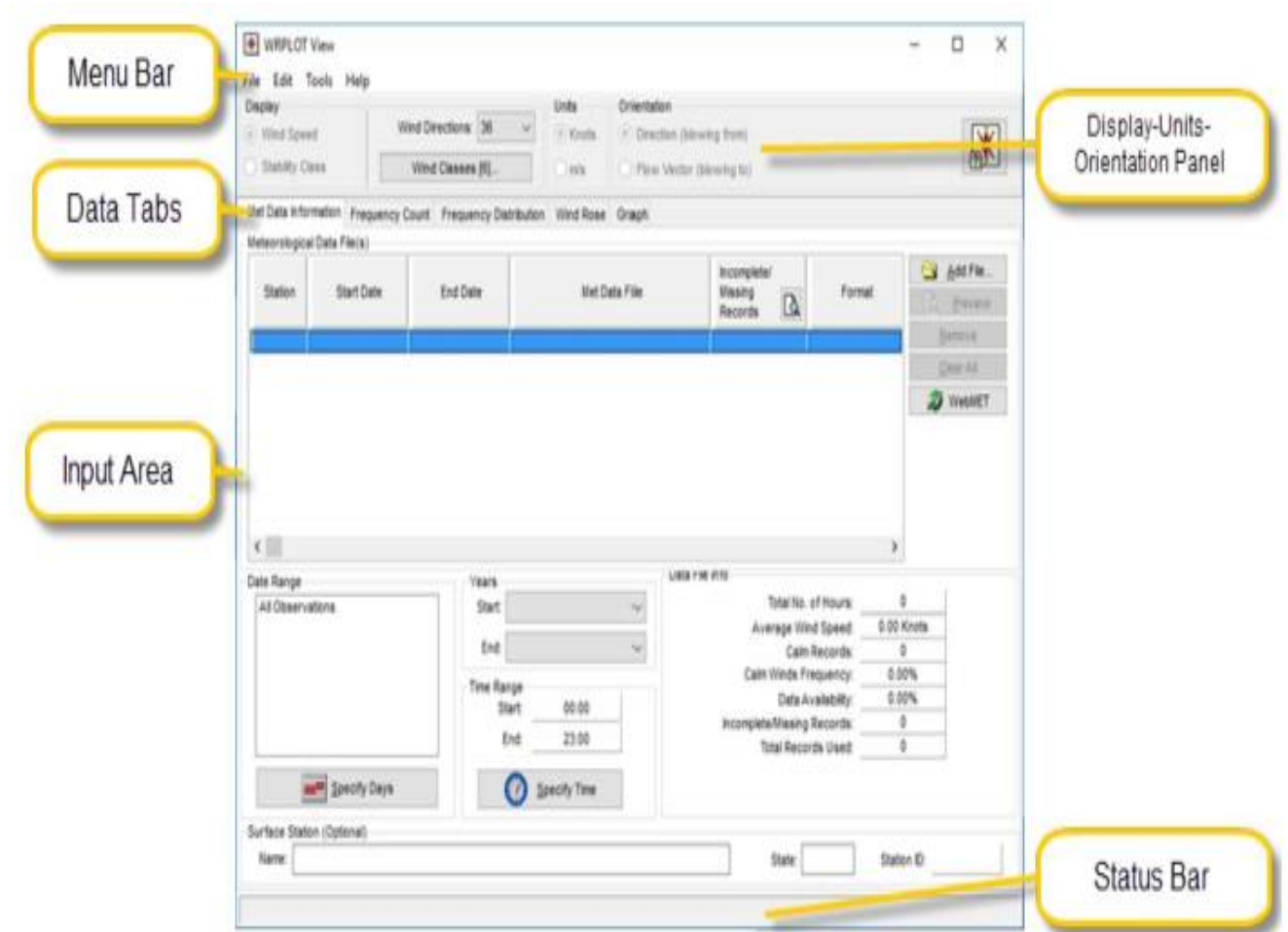
Pulsar el botón de comando “Next >”, después de algunos instantes pulsar el botón “Finalizar” y el software WRPLOT VIEW está instalado Figura 3.13



**Figura 3.13.** Portada de inicio del modelo WRPLOT VIEW View

## Descripción general de la interfaz

WRPLOT View presenta una interfaz amigable e intuitiva que brinda fácil acceso a todas las herramientas. Los componentes de la ventana WRPLOT View se muestran y describen brevemente a continuación: Figura 3.14



**Figura 3.14** Menú principal WRPLOT View

- Barra de menú: muestra los nombres de los menús. Para abrir un menú, mueva el mouse sobre el nombre del menú y luego presione el botón izquierdo del mouse. Aparece un menú desplegable que muestra una lista de comandos relacionados.
- Panel de orientación de unidades de visualización: contiene varias opciones para la configuración de la rosa de los vientos, como unidades y orientación.
- Pestañas: Se utilizan para navegar por la entrada de datos;
- Al seleccionar una pestaña se mostrará el contenido de esa pestaña. Las pestañas disponibles son:

- Información de datos meteorológicos: la pestaña *Información de datos meteorológicos* contiene opciones para configurar los archivos de datos meteorológicos que utilizará la rosa de los vientos, así como su fecha, año y rango de hora para mostrar.
- Recuento de frecuencia: La pestaña *Recuento de frecuencia* mostrará un gráfico que contiene un recuento del número de apariciones de velocidades y direcciones del viento.
- Distribución de frecuencia: la pestaña *Distribución de frecuencia* mostrará un gráfico que contiene porcentajes estadísticos de la aparición de velocidades y direcciones del viento.
- Rosa de los vientos: La pestaña *Rosa de los vientos* contiene la representación gráfica de la Rosa de los vientos, la distribución de la velocidad y dirección del viento.
- Rain Rose: La pestaña *Rain Rose* contiene la representación gráfica de Rain Rose de la distribución de la precipitación para distintos formatos como SAMSON
- Gráfico: La pestaña *Gráfico* contiene un gráfico que traza las distribuciones de frecuencia de la clase de viento o de la tasa de lluvia.
- Área de entrada: esta área muestra el contenido de cada pestaña de entrada.
- Barra de estado: esta área muestra información que describe las acciones de ciertos objetos de la interfaz, mientras mantiene el puntero del mouse sobre ellos.

La **Tabla 3.2** contiene un listado de las estaciones meteorológicas en Argentina, cuya información esta puede solicitarse desde el portal del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para la República Argentina. Es importante destacar que cada estación posee un identificador (ID) único a nivel internacional.

| NOMBRE                            | PROVINCIA       | LATITUD |       | LONGITUD |       | ALTURA<br>[m] | NRO   | NroOACI |
|-----------------------------------|-----------------|---------|-------|----------|-------|---------------|-------|---------|
|                                   |                 | [gr]    | [min] | [gr]     | [min] |               |       |         |
| BASE BELGRANO II                  | ANTARTIDA       | -77     | 52    | -34      | 37    | 256           | 89034 | SAYB    |
| BASE CARLINI (EX JUBANY)          | ANTARTIDA       | -62     | 14    | -58      | 39    | 11            | 89053 | SAYJ    |
| BASE ESPERANZA                    | ANTARTIDA       | -63     | 23    | -56      | 59    | 24            | 88963 | SAYE    |
| BASE MARAMBIO                     | ANTARTIDA       | -64     | 14    | -56      | 37    | 198           | 89055 | SAWB    |
| BASE ORCADAS                      | ANTARTIDA       | -60     | 44    | -44      | 44    | 12            | 88968 | SAYO    |
| BASE SAN MARTIN                   | ANTARTIDA       | -68     | 7     | -67      | 6     | 7             | 89066 | SAYS    |
| AZUL AERO                         | BUENOS AIRES    | -36     | 49    | -59      | 53    | 147           | 87641 | SAZA    |
| BAHIA BLANCA AERO                 | BUENOS AIRES    | -38     | 42    | -62      | 9     | 83            | 87750 | SAZB    |
| BENITO JUAREZ AERO                | BUENOS AIRES    | -37     | 42    | -59      | 47    | 207           | 87649 | SAZJ    |
| BOLIVAR AERO                      | BUENOS AIRES    | -36     | 11    | -61      | 4     | 94            | 87640 | SAZI    |
| CAMPO DE MAYO AERO                | BUENOS AIRES    | -34     | 32    | -58      | 40    | 26            | 87570 | SADO    |
| CORONEL PRINGLES AERO             | BUENOS AIRES    | -38     | 0     | -61      | 19    | 247           | 87683 | SABP    |
| CORONEL SUAREZ AERO               | BUENOS AIRES    | -37     | 27    | -61      | 53    | 233           | 87637 | SAZC    |
| DOLORES AERO                      | BUENOS AIRES    | -36     | 19    | -57      | 43    | 9             | 87648 | SAZD    |
| EL PALOMAR AERO                   | BUENOS AIRES    | -34     | 36    | -58      | 36    | 12            | 87571 | SAOP    |
| EZEIZA AERO                       | BUENOS AIRES    | -34     | 49    | -58      | 32    | 20            | 87576 | SAEZ    |
| JUNIN AERO                        | BUENOS AIRES    | -34     | 33    | -60      | 55    | 81            | 87548 | SAAJ    |
| LA PLATA AERO                     | BUENOS AIRES    | -34     | 57    | -57      | 53    | 23            | 87593 | SADL    |
| LAS FLORES                        | BUENOS AIRES    | -36     | 2     | -59      | 8     | 36            | 87563 | SAEL    |
| MAR DEL PLATA AERO                | BUENOS AIRES    | -37     | 55    | -57      | 34    | 21            | 87692 | SAZM    |
| MARIANO MORENO AERO               | BUENOS AIRES    | -34     | 33    | -58      | 47    | 32            | 87572 | SADJ    |
| MERLO AERO                        | BUENOS AIRES    | -34     | 41    | -58      | 44    | 36            | 87573 | SADR    |
| MORON AERO                        | BUENOS AIRES    | -34     | 40    | -58      | 38    | 24            | 87574 | SADM    |
| NUEVE DE JULIO                    | BUENOS AIRES    | -35     | 26    | -60      | 52    | 76            | 87550 | SAZX    |
| OLAVARRIA AERO                    | BUENOS AIRES    | -36     | 53    | -60      | 13    | 166           | 87643 | SAZF    |
| PEHUJO AERO                       | BUENOS AIRES    | -35     | 50    | -61      | 51    | 87            | 87544 | SAZP    |
| PIGUE AERO                        | BUENOS AIRES    | -37     | 36    | -62      | 23    | 304           | 87679 | SAZE    |
| PUNTA INDIO B.A.                  | BUENOS AIRES    | -35     | 21    | -57      | 17    | 22            | 87596 | SAAI    |
| SAN FERNANDO AERO                 | BUENOS AIRES    | -34     | 27    | -58      | 35    | 5             | 87553 | SADF    |
| TANDIL AERO                       | BUENOS AIRES    | -37     | 14    | -59      | 13    | 175           | 87645 | SAZT    |
| TRENQUE LAUQUEN                   | BUENOS AIRES    | -35     | 58    | -62      | 43    | 95            | 87540 | SAET    |
| TRES ARROYOS                      | BUENOS AIRES    | -38     | 21    | -60      | 17    | 115           | 87688 | SAZH    |
| VILLA GESELL AERO                 | BUENOS AIRES    | -37     | 14    | -57      | 1     | 9             | 87663 | SAZV    |
| AEROPARQUE AERO                   | CAPITAL FEDERAL | -34     | 33    | -58      | 25    | 6             | 87582 | SABE    |
| BUENOS AIRES OBSERVATORIO         | CAPITAL FEDERAL | -34     | 35    | -58      | 29    | 25            | 87585 | SABA    |
| CATAMARCA AERO                    | CATAMARCA       | -28     | 35    | -65      | 45    | 464           | 87222 | SANC    |
| TINOGASTA                         | CATAMARCA       | -28     | 4     | -67      | 33    | 1201          | 87211 | SANI    |
| PRESIDENCIA ROQUE SAENZ PEÑA AERO | CHACO           | -26     | 44    | -60      | 29    | 93            | 87148 | SARS    |
| RESISTENCIA AERO                  | CHACO           | -27     | 26    | -59      | 2     | 52            | 87155 | SARE    |
| COMODORO RIVADAVIA AERO           | CHUBUT          | -45     | 47    | -67      | 27    | 46            | 87860 | SAVC    |
| ESQUEL AERO                       | CHUBUT          | -42     | 54    | -71      | 8     | 797           | 87803 | SAVE    |
| PASO DE INDIOS                    | CHUBUT          | -43     | 51    | -69      | 2     | 460           | 87814 | SAVP    |
| PUERTO MADRYN AERO                | CHUBUT          | -42     | 45    | -65      | 6     | 136           | 87823 | SAVY    |
| TRELEW AERO                       | CHUBUT          | -43     | 12    | -65      | 16    | 43            | 87828 | SAVT    |
| CORDOBA AERO                      | CORDOBA         | -31     | 17    | -64      | 12    | 495           | 87344 | SACO    |
| CORDOBA OBSERVATORIO              | CORDOBA         | -31     | 25    | -64      | 11    | 425           | 87345 | SACK    |
| ESCUELA DE AVIACION MILITAR AERO  | CORDOBA         | -31     | 26    | -64      | 16    | 502           | 87347 | SACE    |

| NOMBRE                           | PROVINCIA           | LATITUD |       | LONGITUD |       | ALTURA<br>[m] | NRO   | NroOACI |
|----------------------------------|---------------------|---------|-------|----------|-------|---------------|-------|---------|
|                                  |                     | [gr]    | [min] | [gr]     | [min] |               |       |         |
| RESISTENCIA AERO                 | CHACO               | -27     | 26    | -59      | 2     | 52            | 87155 | SARE    |
| COMODORO RIVADAVIA AERO          | CHUBUT              | -45     | 47    | -67      | 27    | 46            | 87860 | SAVC    |
| ESQUEL AERO                      | CHUBUT              | -42     | 54    | -71      | 8     | 797           | 87803 | SAVE    |
| PASO DE INDIOS                   | CHUBUT              | -43     | 51    | -69      | 2     | 460           | 87814 | SAVP    |
| PUERTO MADRYN AERO               | CHUBUT              | -42     | 45    | -65      | 6     | 136           | 87823 | SAVY    |
| TRELEW AERO                      | CHUBUT              | -43     | 12    | -65      | 16    | 43            | 87828 | SAVT    |
| CORDOBA AERO                     | CORDOBA             | -31     | 17    | -64      | 12    | 495           | 87344 | SACO    |
| CORDOBA OBSERVATORIO             | CORDOBA             | -31     | 25    | -64      | 11    | 425           | 87345 | SACK    |
| ESCUELA DE AVIACION MILITAR AERO | CORDOBA             | -31     | 26    | -64      | 16    | 502           | 87347 | SACE    |
| LABOULAYE AERO                   | CORDOBA             | -34     | 7     | -63      | 22    | 137           | 87534 | SAOL    |
| MARCOS JUAREZ AERO               | CORDOBA             | -32     | 40    | -62      | 9     | 114           | 87467 | SAOM    |
| PILAR OBSERVATORIO               | CORDOBA             | -31     | 40    | -63      | 52    | 338           | 87349 | SACI    |
| RIO CUARTO AERO                  | CORDOBA             | -33     | 5     | -64      | 16    | 421           | 87453 | SAOC    |
| VILLA DE MARIA DEL RIO SECO      | CORDOBA             | -29     | 54    | -63      | 43    | 341           | 87244 | SACV    |
| VILLA DOLORES AERO               | CORDOBA             | -31     | 57    | -65      | 8     | 566           | 87328 | SAOD    |
| CORRIENTES AERO                  | CORRIENTES          | -27     | 26    | -58      | 45    | 62            | 87166 | SARC    |
| ITUZAINGO                        | CORRIENTES          | -27     | 35    | -56      | 40    | 72            | 87173 | SARO    |
| MERCEDES AERO (CTES)             | CORRIENTES          | -29     | 13    | -58      | 5     | 107           | 87281 | SATM    |
| MONTE CASEROS AERO               | CORRIENTES          | -30     | 15    | -57      | 38    | 54            | 87393 | SARM    |
| PASO DE LOS LIBRES AERO          | CORRIENTES          | -29     | 41    | -57      | 8     | 70            | 87289 | SARL    |
| CONCORDIA AERO                   | ENTRE RIOS          | -31     | 18    | -58      | 0     | 38            | 87395 | SAAC    |
| GUALEGUAYCHU AERO                | ENTRE RIOS          | -33     | 0     | -58      | 36    | 23            | 87497 | SAAG    |
| PARANA AERO                      | ENTRE RIOS          | -31     | 47    | -60      | 29    | 78            | 87374 | SAAP    |
| FORMOSA AERO                     | FORMOSA             | -26     | 12    | -58      | 13    | 60            | 87162 | SARF    |
| LAS LOMITAS                      | FORMOSA             | -24     | 42    | -60      | 35    | 130           | 87078 | SATK    |
| JUJUY AERO                       | JUJUY               | -24     | 23    | -65      | 5     | 907           | 87046 | SA5J    |
| JUJUY U N                        | JUJUY               | -24     | 10    | -65      | 19    | 1302          | 87043 |         |
| LA QUIACA OBSERVATORIO           | JUJUY               | -22     | 6     | -65      | 36    | 3459          | 87007 | SA5Q    |
| GENERAL PICO AERO                | LA PAMPA            | -35     | 41    | -63      | 45    | 145           | 87532 | SAZG    |
| SANTA ROSA AERO                  | LA PAMPA            | -36     | 35    | -64      | 16    | 191           | 87623 | SAZR    |
| VICTORICA                        | LA PAMPA            | -36     | 13    | -65      | 26    | 312           | 87616 | SAHV    |
| CHAMICAL AERO                    | LA RIOJA            | -30     | 20    | -66      | 17    | 461           | 87320 | SACT    |
| CHEPES                           | LA RIOJA            | -31     | 19    | -66      | 35    | 658           | 87322 | SACP    |
| CHILECITO AERO                   | LA RIOJA            | -29     | 13    | -67      | 26    | 947           | 87213 | SANO    |
| LA RIOJA AERO                    | LA RIOJA            | -29     | 22    | -66      | 47    | 429           | 87217 | SANL    |
| MALARGUE AERO                    | MENDOZA             | -35     | 28    | -69      | 35    | 1425          | 87506 | SAMM    |
| MENDOZA AERO                     | MENDOZA             | -32     | 50    | -68      | 47    | 704           | 87418 | SAME    |
| MENDOZA OBSERVATORIO             | MENDOZA             | -32     | 53    | -68      | 52    | 827           | 87420 | SAMK    |
| SAN MARTIN (MZA)                 | MENDOZA             | -33     | 4     | -68      | 27    | 653           | 87416 | SAMI    |
| SAN RAFAEL AERO                  | MENDOZA             | -34     | 35    | -68      | 24    | 748           | 87509 | SAMR    |
| USPALLATA                        | MENDOZA             | -32     | 35    | -69      | 20    | 1891          | 87405 | SAMU    |
| BERNARDO DE IRIGOYEN AERO        | MISIONES            | -26     | 16    | -53      | 40    | 815           | 87163 | SATI    |
| IGUAZU AERO                      | MISIONES            | -25     | 43    | -54      | 28    | 270           | 87097 | SARI    |
| OBERA                            | MISIONES            | -27     | 29    | -55      | 7     | 303           | 87187 | SATO    |
| POSADAS AERO                     | MISIONES            | -27     | 23    | -55      | 58    | 125           | 87178 | SARP    |
| CHAPELCO AERO                    | NEUQUEN             | -40     | 4     | -71      | 8     | 779           | 87761 | SAZY    |
| NEUQUEN AERO                     | NEUQUEN             | -38     | 57    | -68      | 8     | 271           | 87715 | SAZN    |
| BARIOLOCHE AERO                  | RIO NEGRO           | -41     | 8     | -71      | 9     | 835           | 87765 | SAZS    |
| IPOLLETTI                        | RIO NEGRO           | -38     | 56    | -67      | 58    | 265           | 87719 | SAHI    |
| EL BOLSON AERO                   | RIO NEGRO           | -41     | 57    | -71      | 32    | 326           | 87800 | SAVB    |
| MAQUINCHAO                       | RIO NEGRO           | -41     | 14    | -68      | 42    | 888           | 87774 | SAVQ    |
| SAN ANTONIO OESTE AERO           | RIO NEGRO           | -40     | 45    | -65      | 1     | 20            | 87784 | SAVN    |
| VIEDMA AERO                      | RIO NEGRO           | -40     | 51    | -63      | 0     | 7             | 87791 | SAVV    |
| METAN                            | SALTA               | -25     | 31    | -64      | 58    | 855           | 87050 | SASM    |
| ORAN AERO                        | SALTA               | -23     | 9     | -64      | 19    | 357           | 87016 | SASO    |
| RIVADAVIA                        | SALTA               | -24     | 11    | -62      | 53    | 205           | 87065 | SASR    |
| SALTA AERO                       | SALTA               | -24     | 50    | -65      | 28    | 1221          | 87047 | SASA    |
| TARTAGAL AERO                    | SALTA               | -22     | 36    | -63      | 47    | 450           | 87022 | SAST    |
| JACHAL                           | SAN JUAN            | -30     | 13    | -68      | 44    | 1175          | 87305 | SAMJ    |
| SAN JUAN AERO                    | SAN JUAN            | -31     | 34    | -68      | 25    | 598           | 87311 | SANU    |
| SAN LUIS AERO                    | SAN LUIS            | -33     | 16    | -66      | 21    | 713           | 87436 | SAOU    |
| SANTA ROSA DE CONLARA AERO       | SAN LUIS            | -32     | 22    | -65      | 10    | 620           | 87444 | SAOS    |
| VILLA REYNOLDS AERO              | SAN LUIS            | -33     | 43    | -65      | 22    | 486           | 87448 | SAOR    |
| EL CALAFATE AERO                 | SANTA CRUZ          | -50     | 17    | -72      | 3     | 204           | 87904 | SAWC    |
| GOBERNADOR GREGORES AERO         | SANTA CRUZ          | -48     | 46    | -70      | 9     | 358           | 87880 | SAWR    |
| PERITO MORENO AERO               | SANTA CRUZ          | -46     | 32    | -70      | 59    | 429           | 87852 | SAWP    |
| PUERTO DESEADO AERO              | SANTA CRUZ          | -47     | 44    | -65      | 54    | 80            | 87896 | SAMD    |
| RIO GALLEGOS AERO                | SANTA CRUZ          | -51     | 36    | -69      | 18    | 19            | 87925 | SAWG    |
| SAN JULIAN AERO                  | SANTA CRUZ          | -49     | 18    | -67      | 48    | 62            | 87909 | SAWJ    |
| SANTA CRUZ AERO                  | SANTA CRUZ          | -50     | 1     | -68      | 34    | 111           | 87912 | SAWU    |
| CERES AERO                       | SANTA FE            | -29     | 52    | -61      | 56    | 88            | 87257 | SANW    |
| EL TREBOL                        | SANTA FE            | -32     | 11    | -61      | 42    | 96            | 87470 | SAFT    |
| RAFAELA AERO                     | SANTA FE            | -31     | 16    | -61      | 30    | 99            | 87360 | SAFR    |
| RECONQUISTA AERO                 | SANTA FE            | -29     | 12    | -59      | 41    | 53            | 87270 | SATR    |
| ROSARIO AERO                     | SANTA FE            | -32     | 54    | -60      | 46    | 25            | 87480 | SAAR    |
| SAUCE VIEJO AERO                 | SANTA FE            | -31     | 42    | -60      | 48    | 18            | 87371 | SAAV    |
| SUNCHALES AERO                   | SANTA FE            | -30     | 57    | -61      | 31    | 92            | 87356 | SAFS    |
| VENADO TUERTO AERO               | SANTA FE            | -33     | 40    | -61      | 57    | 112           | 87468 | SAFV    |
| SANTIAGO DEL ESTERO AERO         | SANTIAGO DEL ESTERO | -27     | 45    | -64      | 17    | 199           | 87129 | SANE    |
| TERMAS DE RIO HONDO AERO         | SANTIAGO DEL ESTERO | -27     | 30    | -64      | 56    | 280           | 87127 | SANR    |
| RIO GRANDE B.A.                  | TIERRA DEL FUEGO    | -53     | 46    | -67      | 45    | 22            | 87934 | SAWE    |
| USHUAIA AERO                     | TIERRA DEL FUEGO    | -54     | 50    | -68      | 18    | 57            | 87938 | SAWH    |
| TUCUMAN AERO                     | TUCUMAN             | -26     | 50    | -65      | 6     | 450           | 87121 | SANT    |

## Preparación de la Base de Datos

Una de las formas que se presentaran en este capítulo en la importación de datos desde Excel y su conversión en formato SAMSON.

La base de datos debe estar integrada por 7 columnas de datos: id estación, año, mes, día, hora, dirección del viento, velocidad del viento. Figura 3.15

|                                                           |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| LAKES FORMAT                                              |  |  |  |  |  |  |
| * _____                                                   |  |  |  |  |  |  |
| * Rows with * at the beginning of the line are recognized |  |  |  |  |  |  |
| * as comments and are ignored by WRPLOT View              |  |  |  |  |  |  |
| *                                                         |  |  |  |  |  |  |
| * STNID (5)                                               |  |  |  |  |  |  |
| * YEAR (4)                                                |  |  |  |  |  |  |
| * MONTH (2)                                               |  |  |  |  |  |  |
| * DAY (2)                                                 |  |  |  |  |  |  |
| * HOUR (2) 0-23                                           |  |  |  |  |  |  |
| * WDIR (3) deg                                            |  |  |  |  |  |  |
| * WSPD (3) knots                                          |  |  |  |  |  |  |
| *                                                         |  |  |  |  |  |  |

**Figura 3.15** Detalle de carga de datos

En nuestro archivo Excel tendremos nuestros datos de una estación de campo para una campaña de muestro ambiental donde se registraron las siguientes variables para un periodo de 16hs. Figura 3.16

|    | A    | B   | C   | D    | E   | F  | G             |
|----|------|-----|-----|------|-----|----|---------------|
| 1  | Año  | Mes | Día | Hora | Dv  | Vv | Precipitacion |
| 2  | 2021 | 1   | 1   | 1    | 320 | 1  | 10            |
| 3  | 2021 | 1   | 1   | 2    | 320 | 1  | 10            |
| 4  | 2021 | 1   | 1   | 3    | 320 | 1  | 10            |
| 5  | 2021 | 1   | 1   | 4    | 320 | 1  | 0             |
| 6  | 2021 | 1   | 1   | 5    | 320 | 1  | 0             |
| 7  | 2021 | 1   | 1   | 6    | 320 | 1  | 0             |
| 8  | 2021 | 1   | 1   | 7    | 320 | 1  | 0             |
| 9  | 2021 | 1   | 1   | 8    | 320 | 1  | 0             |
| 10 | 2021 | 1   | 1   | 9    | 320 | 10 | 0             |
| 11 | 2021 | 1   | 1   | 10   | 320 | 10 | 0             |
| 12 | 2021 | 1   | 1   | 11   | 320 | 10 | 0             |
| 13 | 2021 | 1   | 1   | 12   | 90  | 10 | 0             |
| 14 | 2021 | 1   | 1   | 13   | 90  | 10 | 0             |
| 15 | 2021 | 1   | 1   | 14   | 90  | 3  | 0             |
| 16 | 2021 | 1   | 1   | 15   | 90  | 3  | 0             |
| 17 | 2021 | 1   | 1   | 16   | 90  | 3  | 0             |

**Figura 3.16** Registro diferenciado para el año 2021 con mes, día, hora, dirección del viento, intensidad y cantidad de precipitación por hora.

Para importar una base de datos en Excel desde el programa WRPLOT View, vaya a la barra de menús y seleccione el menú *Herramientas (Tools) Importar desde Excel (Import from Excel)*, se desplegará la ventana de la Figura 3.17. Para cargar la base de datos presione en la carpeta amarilla y seleccione el archivo. Luego, en el área de datos de campo indique en que columnas se encuentran el año, mes, día y hora, velocidad y dirección del viento. También complete la parte de información de la estación. Luego guarde el archivo en la dirección que desee o simplemente presione *importar (import)* para que el archivo se salve con extensión \*.sam

**Import Surface Data from Excel**

Import Surface Data From (Excel File): D:\...WRPLOT\met para discutir.xlsx

Save Surface File As (SAMSON Format): D:\...WRPLOT\met para discutir.sam

**Data Fields** | Station Information

| # | Data Field Name      | Excel Column Name | Missing Indicator in Excel File | Unit in Excel File | Number Type        |
|---|----------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | Year                 |                   |                                 | N/A                | YY, YYYY           |
| 2 | Month                |                   |                                 | N/A                | 1 to 12            |
| 3 | Day                  |                   |                                 | N/A                | 1 to 31            |
| 4 | Hour                 |                   |                                 | 01 to 24           | 00 to 23, 01 to 24 |
| 5 | Wind Direction       |                   |                                 | degrees            | Integer            |
| 6 | Wind Speed           |                   |                                 | m/s                | Decimal            |
| 7 | Hourly Precipitation |                   |                                 | hundredths of inc  | Integer            |

First Row to Import: 1 Set Last Row to Import: 24 Set Import

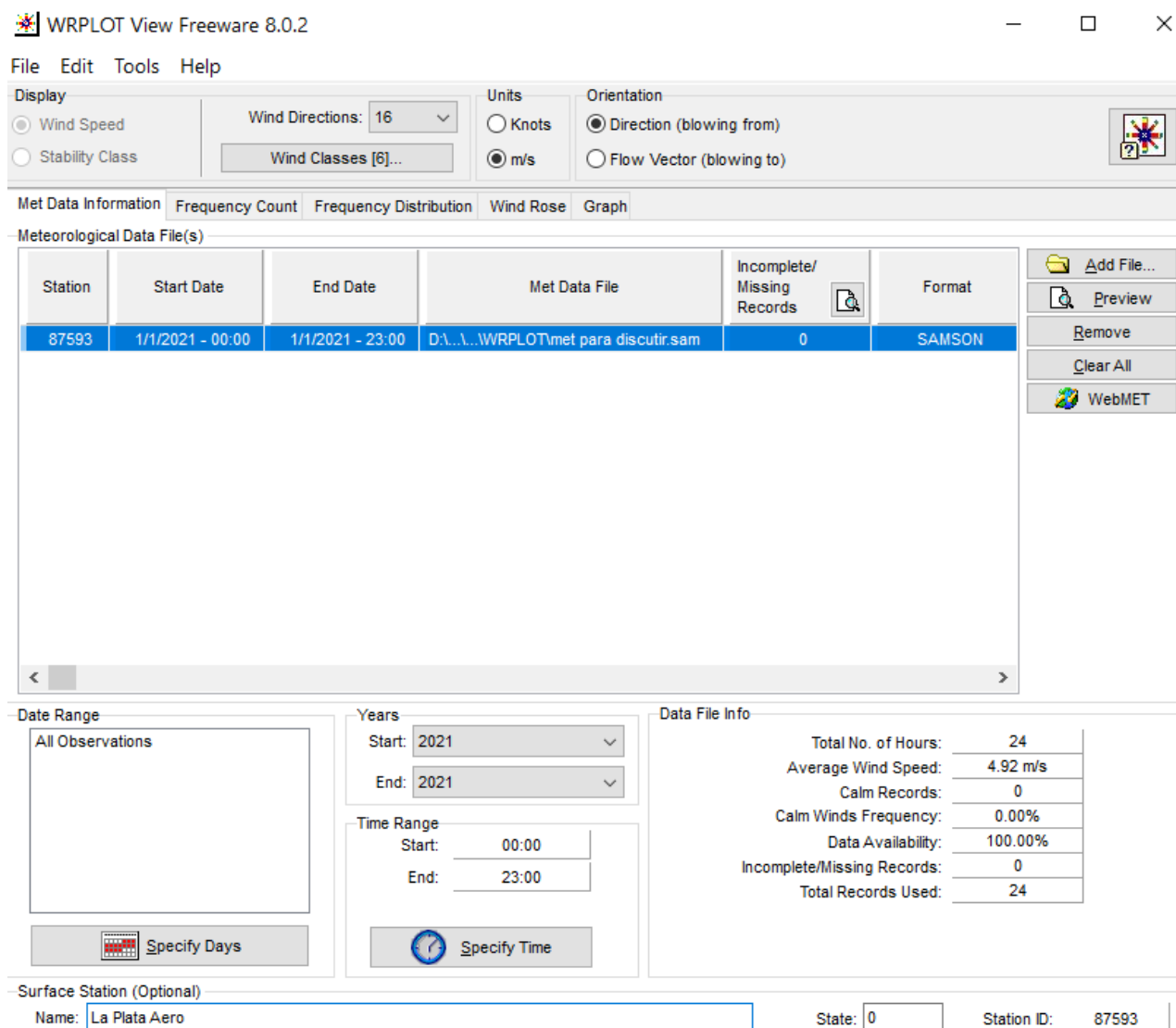
**Excel File** | SAMSON File

|    | A    | B | C | D  | E   | F  | G  |
|----|------|---|---|----|-----|----|----|
| 2  | 2021 | 1 | 1 | 2  | 320 | 1  | 10 |
| 3  | 2021 | 1 | 1 | 3  | 320 | 1  | 10 |
| 4  | 2021 | 1 | 1 | 4  | 320 | 1  | 0  |
| 5  | 2021 | 1 | 1 | 5  | 320 | 1  | 0  |
| 6  | 2021 | 1 | 1 | 6  | 320 | 1  | 0  |
| 7  | 2021 | 1 | 1 | 7  | 320 | 1  | 0  |
| 8  | 2021 | 1 | 1 | 8  | 320 | 1  | 0  |
| 9  | 2021 | 1 | 1 | 9  | 320 | 10 | 0  |
| 10 | 2021 | 1 | 1 | 10 | 320 | 10 | 0  |
| 11 | 2021 | 1 | 1 | 11 | 320 | 10 | 0  |

Help Close

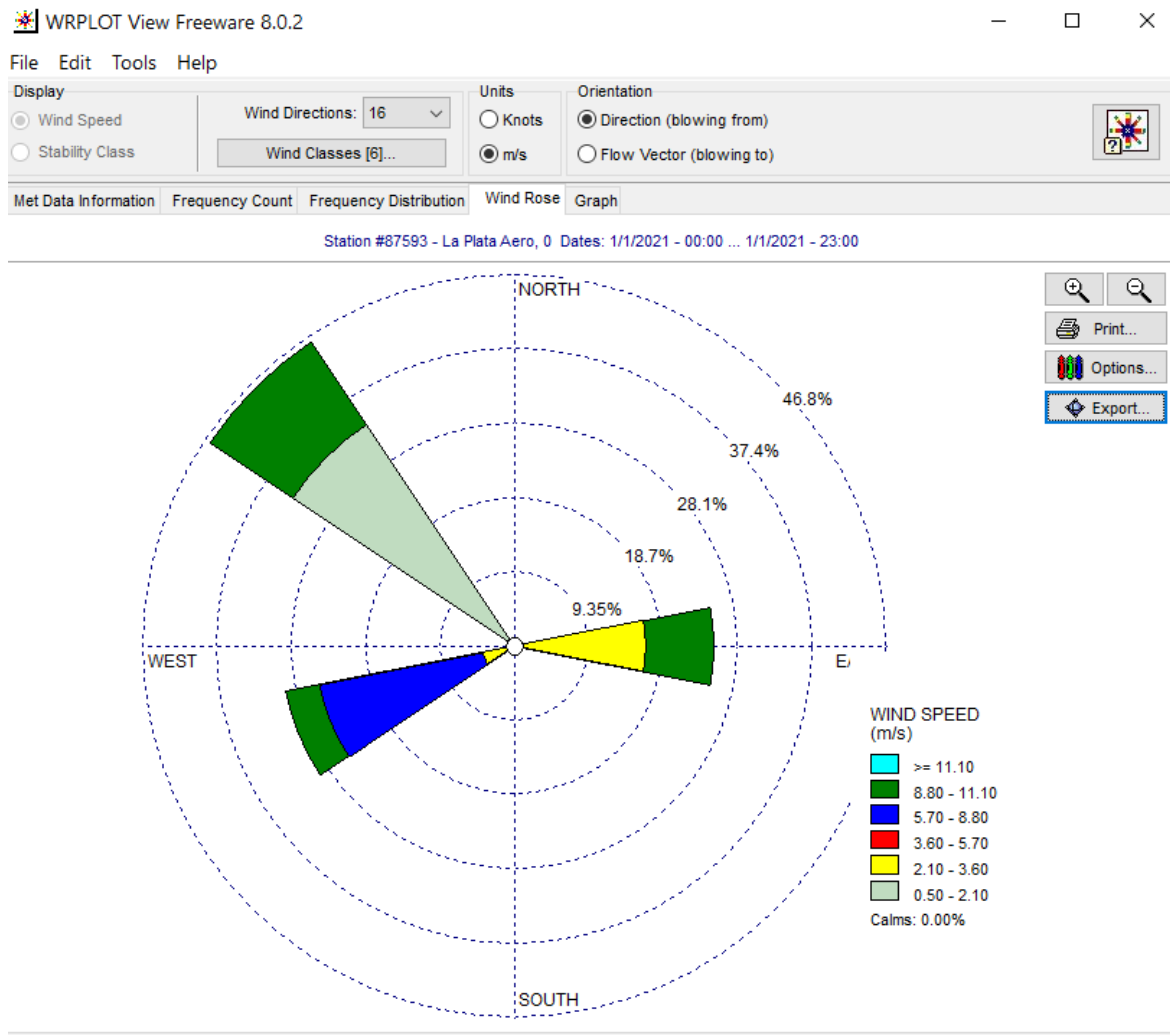
**Figura 3.17** Módulo de carga de datos vía Excel o manual.

Para obtener la rosa de vientos, cierre y regrese a la ventana principal y cargue el archivo presionando *Add File* y buscando el archivo con extensión \*.sam (Figura 3.18).



**Figura 3.18:** Carga del archivo tipo sam procesado.

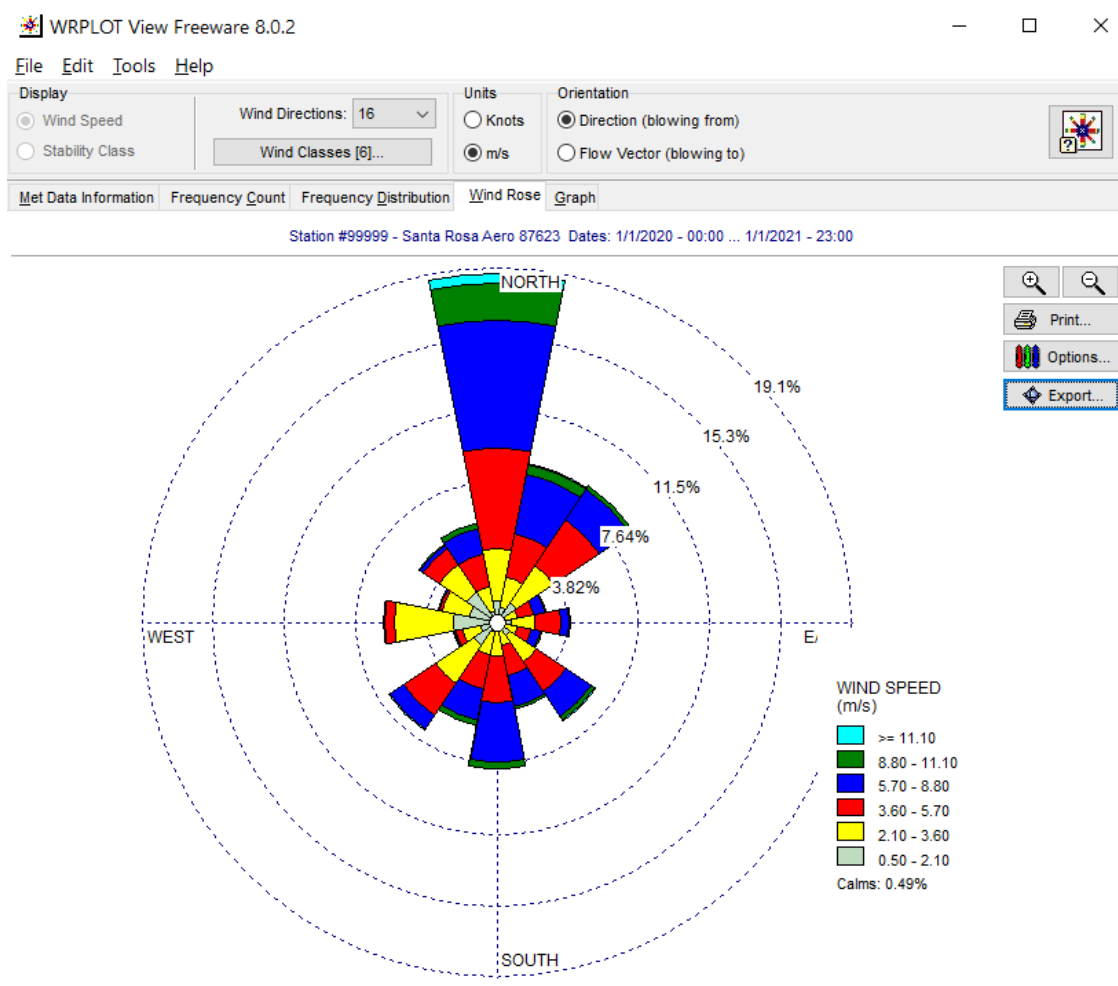
Puede visualizar la rosa de vientos seleccionando la pestaña *Wind Rose* (Figura 22). Esta se mostrará en lo que se conoce el área de entrada (Figura 3.19).



**Figura 3.19:** Rosa de vientos construido con un registro en Excel de 16hs obtenido de una estación meteorológica portátil para una campaña de muestro ambiental

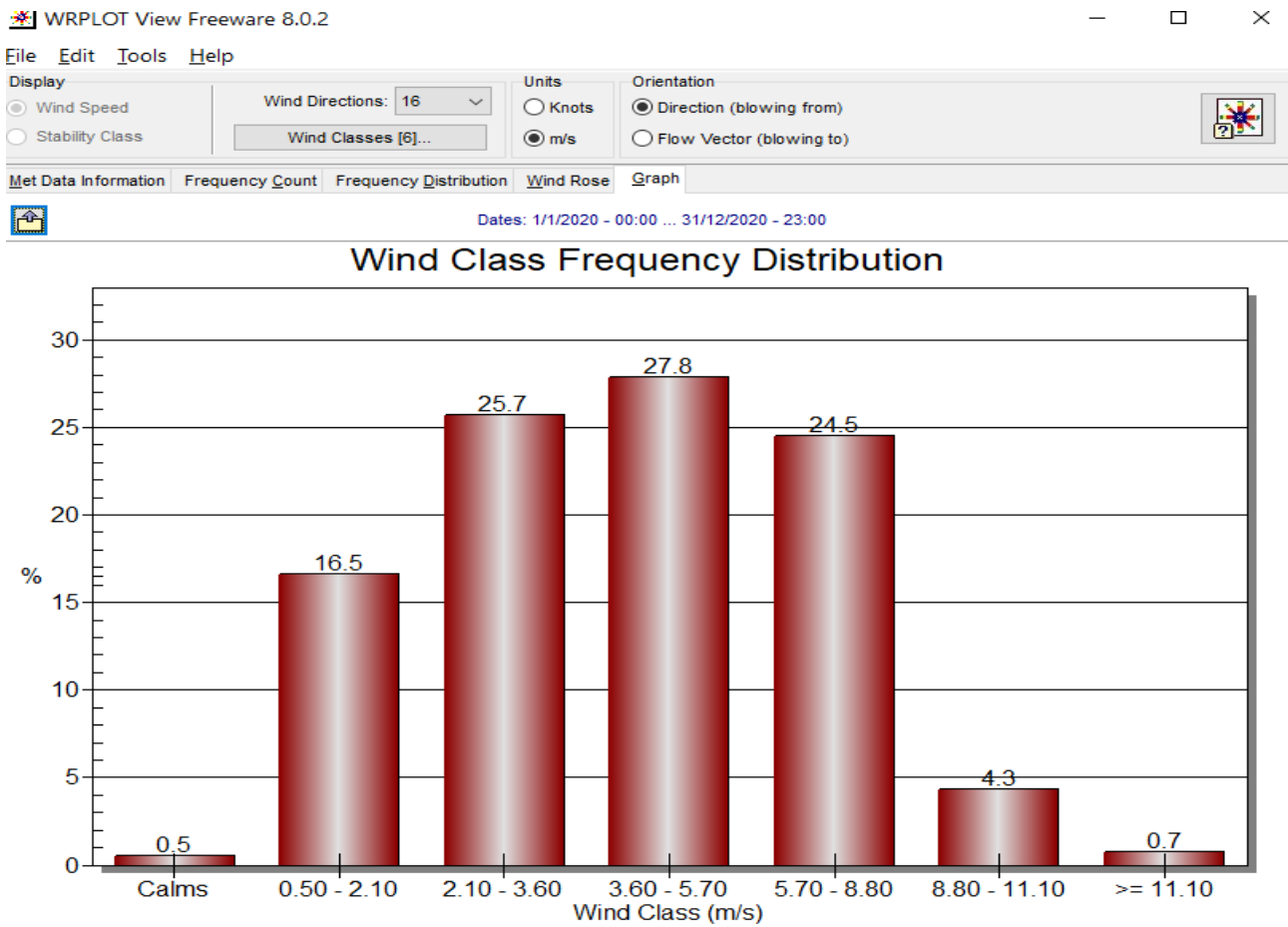
## Registros automáticos

A continuación, se muestran los resultados con una base de datos más extensa. La información corresponde a la estación meteorológica de Santa Rosa, La Pampa, ID 87623 para el periodo del 1 de enero de 2020 al 31 de diciembre de 2020. Figura 3.20



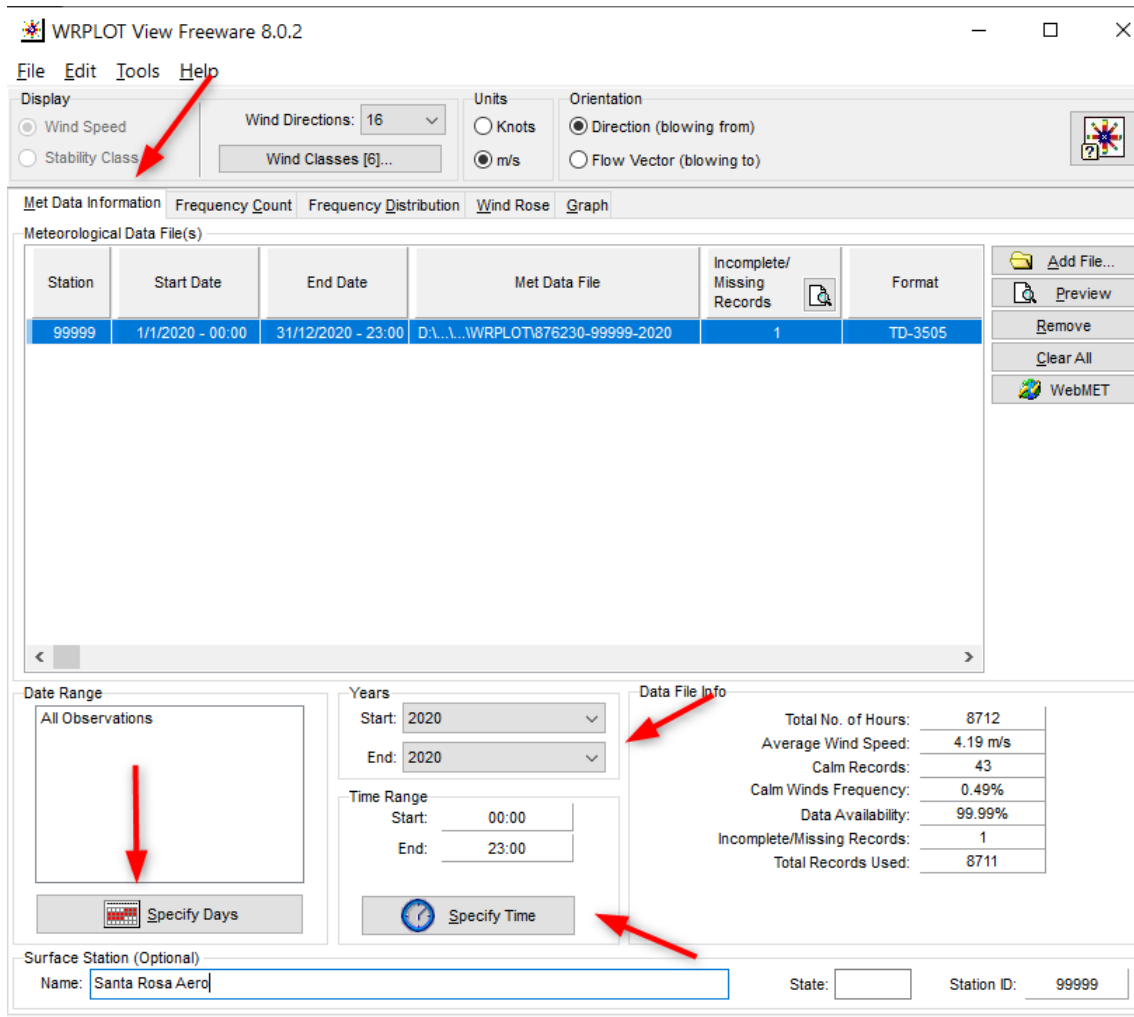
**Figura 3.20.** Rosa de vientos procesada procedente de la estación Santa Rosa Aero periodo 2020

Después de exportar la base de datos y definir todos los parámetros correspondientes explicados antes, la rosa de vientos para todo el periodo considerado se presenta en la Figura 3.20. Se extrae de esta misma que el viento dominante fue del norte (N) y que mayormente estos vientos estuvieron en el rango de 5.7 m/s a 8.8 m/s. Información cuantitativa se puede visualizar en la pestaña *Frequency Distribution* de la ventana principal del software. Figura 3.21



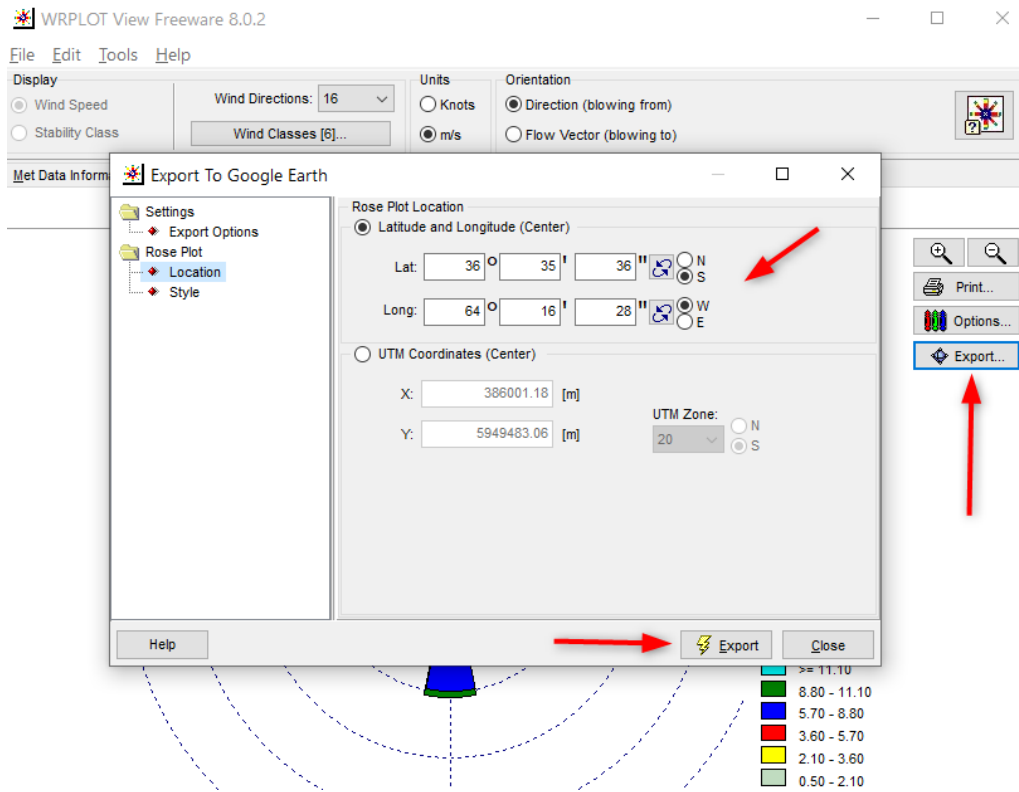
**Figura 3.21.** Muestra la frecuencia por clase de vientos o por rango de los vientos que soplaron en la estación de Santa Rosa en el periodo considerado. Esta se obtuvo con la pestaña Graph. Se puede concluir que los vientos más frecuentes estuvieron en el rango de 3.60 m/s a 5.7 m/s.

La Figura 3.22 muestra cómo se puede obtener la rosa de vientos anual, mensual y para ciertos días específicos o para ciertas horas durante el día. Primero debe seleccionar la pestaña *Met Data Information*, luego seleccionar el año en cuestión en el menú de cascada *year*. Se puede especificar un intervalo de tiempo durante el día con la opción *Specify Time* o seleccionar días específicos del año con la opción *Specify Days*.



**Figura 3.22.** Menú de configuración para la construcción de rosas de viento con periodo de tiempo ajustable.

La Rosa de vientos calculada puede exportarse en un formato kml/kmz para ser visualizado en un sistema de información geográfico, en este caso se indicará como visualizar con el programa Google Earth Pro, para ello además de tener preinstalado el programa se deberá ir a la pestaña Wind Rose, marcar el botón Export y cargar la información sobre la ubicación georreferenciada. Para ello utilizamos los datos oficiales detallados en la **Tabla 3.2** para el ID de Santa Rosa Aero que se le ID 87623. Completada la información y los pasos según Figura 3.22 se selecciona Import. Figura 3.23.



**Figura 3.23.** Pasos para la exportación y proyección de resultados

Finalmente, la proyección final se visualiza sobre el terreno geolocalizado para la estación de interés según Figura 3.24



**Figura 3.24** Resultados obtenidos proyectados en Google earth Pro mendiante archivo .KMZ

## Bibliografía

Porta, A., Sánchez, E. Y., Colman, E., Massolo, L., & Castagnasso, G. (s.f.). *Calidad del aire: Monitoreo y modelado de contaminantes atmosféricos. Efectos en la salud pública*.

Ahrens, C. D. (2013). *Meteorology today: An introduction to weather, climate and the environment* (10th ed.). Brooks/Cole, Cengage Learning.

Stull, R. B. (1999). *Meteorology for scientists and engineers* (2nd ed.). Brooks/Cole Publishing Company.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007a). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (R. K. Pachauri & A. Reisinger, Eds.). IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007b). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller, Eds.). Cambridge University Press.

Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT). (2004). *Meteorología y climatología. Semana de la Ciencia y la Tecnología 2004*. FECYT.

United States Government. (1976). *U.S. standard atmosphere, 1976* (NOAA-S/T 76-1562). Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office.

Thé, J. L., Thé, C. L., & Johnson, M. A. (1998–2016). *WRPLOT View™ user guide*. Lakes Environmental Software.

## CAPÍTULO 4

# Aplicación de modelos de dispersión de contaminantes en aire

**Resumen:** En este capítulo se desarrollará el análisis de aplicación de algunas de las herramientas más utilizadas en el modelado en aire en nuestro país tanto en su uso en aplicaciones reglamentarias como no reglamentarias. Se abordará el enfoque aplicado en la legislación de la Provincia de Buenos Aires como ejemplo de herramienta utilizada en el ámbito de la gestión ambiental por el Organismo de control.

### Introducción

El aumento de la conciencia ambiental y, por ende, el desarrollo del marco legislativo atmosférico a nivel mundial resalta la clara necesidad de herramientas adicionales a los sistemas de control y medición de generadores de efluentes gaseosos. Estas herramientas deben permitir realizar cálculos predictivos de manera ágil para respaldar la toma de decisiones y la implementación de medidas correctivas.

Dentro de estas herramientas, los modelos de dispersión atmosférica son particularmente interesantes debido a su capacidad para proporcionar datos anticipados sobre los efectos de las emisiones de partículas y gases, convirtiéndose así en un recurso valioso y poderoso. Estos modelos permiten no solo controlar y anticipar los impactos ambientales, sino también establecer medidas correctivas para evitar futuras sanciones por no cumplir con los límites legales en materia de calidad del aire.

Además, los modelos de dispersión atmosférica brindan a los organismos de evaluación y control la posibilidad de evaluar el impacto de los generadores de efluentes gaseosos de diferente envergadura en la población y los ecosistemas. Su utilidad se extiende también a las evaluaciones de impacto ambiental, donde pueden ser utilizados como herramientas preventivas antes de la instalación o ejecución de nuevos proyectos, ayudando así a minimizar los posibles efectos adversos sobre el medio ambiente y la salud pública (USEPA, 2024)

Las actividades que tienen el potencial de emitir contaminantes atmosféricos deben considerar los modelos de dispersión de contaminantes como aliados clave. Estas herramientas son fundamentales para controlar las emisiones a la atmósfera y comprender los efectos de la dispersión atmosférica. Además de ayudar a cumplir con los requisitos legales, estos modelos fomentan prácticas más responsables y sostenibles en el manejo de las emisiones.

En tal sentido, los modelos de dispersión de contaminantes en el aire proporcionan una representación matemática precisa de los procesos complejos de transporte, transformación y eliminación de contaminantes emitidos por una fuente específica. Esto permite no solo observar

y estimar las concentraciones en un punto receptor situado aguas abajo, sino también evaluar el impacto ambiental y tomar medidas preventivas adecuadas (Massolo, 2015, Massolo, 2022, US-EPA,2024).

### **Aplicaciones de los modelos de dispersión de contaminantes en aire**

- Análisis del impacto en la calidad del aire por los contaminantes atmosféricos. Este aspecto es fundamental para comprender cómo las emisiones afectan el entorno y la salud pública. Este análisis evalúa la presencia y distribución de contaminantes en la atmósfera, así como sus efectos potenciales en la calidad del aire y en la salud de la población. Además, proporciona información crucial para desarrollar estrategias de gestión ambiental y medidas de mitigación que contribuyan a mejorar la calidad del aire y a proteger la salud de las personas y el ambiente. El análisis del impacto en la calidad del aire por los contaminantes atmosféricos es esencial para comprender la magnitud de la contaminación y sus efectos en la salud humana y el ambiente, lo que permite desarrollar políticas y medidas de control efectivas para mitigar los riesgos asociados.
- Cálculo de los límites de emisión necesarios para cumplir con los estándares de calidad ambiental del aire. Este proceso implica determinar las cantidades máximas de contaminantes que pueden ser liberadas al ambiente sin exceder los límites establecidos por las regulaciones ambientales. Estos cálculos se basan en modelos de dispersión de contaminantes y consideran diversos factores como las características de las fuentes de emisión, las condiciones meteorológicas y la sensibilidad del entorno receptor. De esta manera, se establecen medidas de control y se diseñan políticas ambientales efectivas para proteger la calidad del aire y la salud pública.
- Estimación de la concentración de un contaminante en el aire ambiente cuando no se dispone de un equipo de monitoreo. Esta estimación se basa en modelos matemáticos de dispersión de contaminantes, los cuales utilizan datos sobre las fuentes de emisión, las condiciones meteorológicas y las características del terreno para predecir la dispersión y concentración de contaminantes en el aire. A través de estos modelos, se puede obtener una evaluación aproximada de la calidad del aire en áreas donde no se realiza monitoreo directo, lo que permite tomar medidas preventivas y de control para proteger la salud pública y el medio ambiente.
- Identificación de áreas con potencial alta concentración de contaminantes y riesgo para la salud de la población. Este proceso implica el uso de modelos de dispersión de contaminantes y análisis de datos para determinar las zonas donde las emisiones de contaminantes atmosféricos pueden acumularse y alcanzar

niveles peligrosos para la salud humana. Al identificar estas áreas, las autoridades pueden implementar medidas de control y regulaciones específicas para reducir la exposición de la población a la contaminación del aire y mitigar los riesgos asociados con enfermedades respiratorias y otros problemas de salud.

- Utilización de modelos de "tiempo real" en casos de accidentes nucleares, industriales o derrames químicos para calcular la dirección, dispersión y áreas críticas de concentración de sustancias tóxicas. Estos modelos emplean datos en tiempo real sobre las condiciones meteorológicas, características del terreno y propiedades de los contaminantes para simular la propagación y comportamiento de las sustancias peligrosas. Al proporcionar información instantánea y precisa, estos modelos permiten a los equipos de respuesta a emergencias tomar decisiones informadas sobre evacuaciones, medidas de protección y acciones de limpieza para mitigar los efectos adversos en la salud humana y el ambiente.
- Aplicación de modelos matemáticos después de un accidente. es fundamental para llevar a cabo un análisis exhaustivo con el propósito de mejorar el sistema de control y prevenir futuras incidencias similares. Estos modelos permiten evaluar las causas y consecuencias del accidente, identificar áreas de mejora en los protocolos de seguridad y gestión de emergencias, y desarrollar estrategias de prevención más efectivas. Al utilizar datos reales del accidente y simular diferentes escenarios, los modelos ayudan a las autoridades y organizaciones a optimizar la gestión de emergencias y la seguridad pública, garantizando una respuesta más eficiente y preparada ante posibles incidentes futuros.

### **Clasificación de los modelos de dispersión de contaminantes en aire**

Entre las diversas clasificaciones de los modelos de dispersión de contaminantes en aire podemos utilizar la clasificación según su grado de complejidad. En tal sentido, los modelos de dispersión de contaminantes se pueden clasificar en dos niveles de sofisticación: modelos de sondeo y modelos refinados.

El modelo de sondeo, también conocido como modelo de "screening" o de proyección, se utiliza inicialmente para obtener una visión general y determinar si se necesita aplicar un modelo más complejo, como el refinado. Estos modelos son simples y emplean técnicas y suposiciones de estimación relativamente sencillas. Al utilizar estos modelos, se tiende a ser cauteloso en las estimaciones, lo que significa que los datos son conservadores y no deberían sobreestimar los niveles de concentración de contaminantes al compararse con los resultados de un modelo refinado.

Estos modelos son valiosos en las primeras etapas de evaluación de la contaminación atmosférica, proporcionando una estimación inicial y rápida de la dispersión de contaminantes y su posible impacto en el entorno, lo que facilita la toma de decisiones sobre si es necesario realizar un análisis más detallado con un modelo refinado.

El segundo nivel es el modelado refinado, que implica cálculos más analíticos y complejos. Requiere información detallada sobre la fuente de emisión, las condiciones meteorológicas y el terreno, así como un mayor número de datos de entrada. Este enfoque más sofisticado permite una representación más precisa de la dispersión de contaminantes y su impacto en el medio ambiente, lo que facilita la toma de decisiones informadas en la gestión de la calidad del aire y la protección de la salud pública, además de proporcionar una base sólida para el diseño e implementación de estrategias de mitigación y control de la contaminación atmosférica.

A diferencia de los modelos de sondeo, que asumen condiciones meteorológicas desfavorables y simplificaciones del terreno, los modelos refinados se basan en información detallada sobre el terreno y la fuente de emisión, así como en datos meteorológicos reales. Esta riqueza de información permite una representación más precisa de la dispersión de contaminantes y sus efectos en el entorno. Como resultado, se obtienen estimaciones más confiables de la concentración de contaminantes en las áreas circundantes a la fuente de emisión, lo que es fundamental para la toma de decisiones informadas en la gestión de la calidad del aire y la protección de la salud pública.

En resumen, los modelos refinados proporcionan una herramienta más poderosa y precisa para prever y evaluar el impacto de la contaminación atmosférica. Esta mejora en la precisión de las estimaciones contribuye a una gestión más eficaz de la calidad del aire y a una mayor protección de la salud de la población y del medio ambiente.

## **Modelos utilizados en la provincia de Buenos Aires**

En la República Argentina, la provincia de Buenos Aires establece en su legislación la aplicación de modelos de dispersión de contaminantes en el aire para estimar el impacto causado por las emisiones fijas sobre la calidad del aire. En este sentido, la normativa fija su aplicación en el Decreto 1074/18, el cual reglamenta la Ley 5965 de protección a las fuentes de provisión y a los cursos y cuerpos receptores de agua y a la atmósfera (PBA-Decreto 1074/18, 2024). Además, la Resolución OPDS 559/19 detalla el procedimiento para la aplicación de estos modelos (PBA-Resolución 559/19, 2024). En su anexo III, se presentan tres etapas de cálculo en orden creciente de complejidad a saber:

Etapa 1: Sondeo simple

Etapa 2: Sondeo detallado

Etapa 3: Modelación detallada

## **Etapa 1 de sondeo simple**

Este análisis ofrece una estimación aproximada de las concentraciones de contaminantes en el aire bajo las condiciones más desfavorables. Los cálculos son simples y se basan en el modelo de difusión atmosférica gaussiano. La Resolución mencionada proporciona detalles sobre las ecuaciones que deben aplicarse para obtener resultados conservadores, dado que la simplicidad de los cálculos aumenta la posibilidad de errores.

Para considerar estos posibles errores, las concentraciones totales obtenidas mediante el modelo de sondeo se comparan con el 30 % de los valores establecidos en las tablas de normas de calidad de aire (Tabla A) y niveles guía (Tabla B) del Decreto 1074/18. Si las concentraciones calculadas no superan este umbral, no es necesario continuar con las siguientes etapas de cálculo.

Este enfoque proporciona una evaluación inicial rápida y conservadora del impacto de las emisiones fijas sobre la calidad del aire, lo que permite identificar áreas que pueden requerir un análisis más detallado con modelos refinados. Además, al establecer un límite de comparación con los estándares de calidad del aire, se garantiza que se tomen medidas preventivas adecuadas para proteger la salud pública y el medio ambiente.

Este enfoque también sirve como un punto de partida para la planificación de estrategias de control de la contaminación y para priorizar acciones de mitigación en áreas con concentraciones de contaminantes cercanas o por encima de los umbrales establecidos.

## **Etapa 2 de sondeo detallado**

La etapa II comparte los mismos objetivos que la etapa I, pero su metodología de cálculo es más compleja para lograr una mayor precisión en las estimaciones. El análisis por sondeo detallado adoptado para la Etapa II presenta dos medidas de precaución para garantizar que se consideren las condiciones más desfavorables posibles en la evaluación de la concentración máxima total para cada uno de los períodos de tiempo establecidos en el Decreto N° 1074/18:

- 1- La evaluación del aporte relativo de las emisiones de la Industria se basa en un barrido exhaustivo de condiciones atmosféricas, lo que permite identificar la situación ambientalmente más desfavorable. Esto asegura que se contemplen todas las posibles

variaciones en las condiciones meteorológicas que podrían influir en la dispersión de contaminantes.

- 2- Cada concentración máxima total calculada se referencia a la mitad del valor correspondiente establecido en el Decreto N° 1074/18. Esta medida de precaución adiciona un margen de seguridad adicional al proceso de evaluación, asegurando que incluso en las condiciones más adversas, las concentraciones estimadas se mantengan por debajo de los límites establecidos por la normativa ambiental.

Cabe destacar que si no se sobrepasa este valor del 50 % de los valores establecidos en el Decreto 3395/96, no es necesario proseguir con las siguientes etapas de cálculo

### **Etapas 3 de modelación detallada**

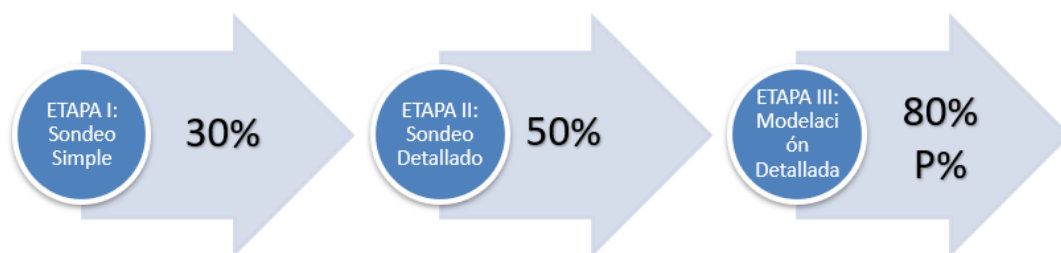
La Etapa III se enfoca exclusivamente en el uso de modelos detallados, los cuales deben ser seleccionados de entre aquellos incluidos en la versión actualizada de la "Guideline on Air Quality Models, Revised" al momento de llevar a cabo el estudio. Esta fase descarta el uso de modelos de sondeo, priorizando la precisión y la exhaustividad en la evaluación del impacto de las emisiones.

Para utilizar los modelos detallados, se requiere una base de datos meteorológicos horarios con un periodo no inferior a los 5 años. Es esencial que estos datos provengan del Servicio Meteorológico Nacional y que se especifique la estación meteorológica seleccionada para garantizar la representatividad y la calidad de la información utilizada en el análisis.

Durante esta etapa, se compara las concentraciones totales estimadas por el modelo seleccionado con el 80% de los valores establecidos en el Decreto 1074/18. Este enfoque proporciona un margen de seguridad adicional y asegura que incluso en condiciones ambientales adversas, las concentraciones de contaminantes permanezcan por debajo de los límites establecidos por la normativa.

Es importante destacar que, si el generador de los efluentes gaseosos lo considera adecuado, puede optar por iniciar directamente esta etapa sin pasar por las etapas anteriores, lo que permite un enfoque más focalizado y eficiente en la evaluación del impacto ambiental.

En la figura 4.1 se resumen los aspectos destacados en este apartado



**Figura 4.1:** Resumen de las etapas de cálculo según Resolución OPDS 559/19 de la Provincia de Buenos Aires

En resumen, la Resolución 559/19 proporciona un marco claro y práctico para realizar el cálculo de las concentraciones de contaminantes atmosféricos, promoviendo así la gestión ambiental responsable y el cumplimiento de las normativas establecidas (PBA-Resolución 559/19,2024).

A continuación, se hará una descripción más detallada de cada una de las etapas ejemplificando distintos usos de las mismas.

Cuando existe información de base comunes en las 3 etapas como ser las características de las fuentes de emisión en particular las fuentes puntuales relacionadas a las chimeneas y las concentraciones de fondo a considerar luego de las modelaciones realizadas para los distintos contaminantes y sus periodos de tiempo regulados.

### Características de las fuentes emisoras

Para estimar el impacto sobre la calidad del aire producido por fuentes puntuales fijas estacionarias de emisión de efluentes gaseosos se deben conocer algunas características de las fuentes de emisión, indicadas en la Declaración Jurada del Anexo II del Decreto N° 1074/18. La siguiente información es necesaria para las tres etapas de cálculo:

- 1) Caudal másico de emisión ( $Q$ ) (mg/s)
- 2) Altura de la chimenea o conducto ( $h_{ch}$ ) (m)
- 3) Temperatura de los gases a la salida de la chimenea ( $T_s$ ) (K)
- 4) Diámetro interno de la chimenea o conducto ( $d_s$ ) (m)
- 5) Velocidad de salida de los gases de la chimenea ( $V_s$ ) (m/s)

Cabe destacar que la correcta medición o cálculo de cada uno de estos parámetros es crucial para garantizar la confiabilidad de los resultados que arrojará cada una de las etapas de modelado que vayamos a realizar posteriormente. Sin una precisión adecuada en la obtención de estos datos, se corre el riesgo de que las conclusiones obtenidas sean erróneas o poco fiables, lo que podría comprometer el éxito de todo el proceso de modelado y análisis. Por lo tanto, es fundamental dedicar tiempo y recursos suficientes a esta fase inicial, asegurándose de que todas las mediciones sean precisas y consistentes para obtener resultados significativos y confiables en las etapas posteriores del proyecto.

La Agencia de Protección Ambiental de los estados Unidos (USEPA) proporciona una descripción de cada uno de esos métodos de medición. También podemos encontrar una buena descripción en el libro “Guía para los ensayos en chimenea” (Bajano, 2006)

### **Valores de concentración de fondo**

La concentración de fondo de contaminantes en la calidad del aire se define en función de los niveles típicos o base de contaminantes presentes en el aire ambiente en ausencia de fuentes locales significativas de emisiones. Estos contaminantes pueden incluir compuestos como dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), partículas en suspensión (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), entre otros.

La concentración de fondo es importante porque proporciona una referencia para evaluar el impacto de las fuentes de contaminación locales y regionales. Las mediciones de concentración de fondo se realizan típicamente en áreas no influenciadas por emisiones antropogénicas significativas, como en zonas rurales o en áreas donde las fuentes locales de emisiones han sido minimizadas.

Entender la concentración de fondo de contaminantes nos permite evaluar la calidad del aire en una región determinada y para desarrollar estrategias efectivas de control de la contaminación atmosférica. Además, proporciona información importante para la evaluación de riesgos para la salud asociados con la exposición crónica a contaminantes atmosféricos.

En el caso de la aplicación en los modelos de dispersión utilizaremos la concentración de fondo para determinar el aporte de las fuentes que estamos evaluando al fondo de la región donde se encuentran dichas fuentes.

La resolución 559/19 en su anexo III considera dos situaciones para la determinación de las concentraciones de fondo 1 que la fuente de generación de emisiones gaseosas en estudios está relativamente aislada de otras fuentes dos que la fuente de generación de emisiones gaseosas se encuentre en la vecindad de otras fuentes.

En cualquiera de los casos los valores de la concentración de fondo a consignar corresponden a las concentraciones críticas promediadas, considerando los períodos de tiempo

correspondientes a cada contaminante. El valor de fondo será contra el que se evaluará el impacto producido por las emisiones gaseosas del generador de emisiones gaseosas a analizar. Es importante tomar en cuenta las zonas de interacción entre las fuentes vecinas y las fuentes en estudio. La metodología para obtener concentración de fondo podrá basarse en la obtención de datos de monitoreo especialmente diseñados a este fin mediante campañas de monitoreo en calidad de aire para períodos determinados, o bien sobre la base de inventarios de emisiones propias del o los establecimientos industriales y/o de terceros, entre otras.

## **Etapas I: Sondeo simple**

Para la aplicación de la Etapa I se supone una temperatura de aire ambiente  $T_a = 293^\circ\text{K}$  y distintas velocidades del viento ( $u = 1 \text{ m/s}, 2 \text{ m/s}, 3 \text{ m/s}, 5 \text{ m/s}, 10 \text{ m/s}$ ).

El procedimiento descrito y utilizado en esta etapa se basa en el modelo de difusión atmosférica bigaussiano, una metodología ampliamente reconocida por su capacidad para evaluar el impacto ambiental de fuentes estacionarias de emisión de efluentes gaseosos. Esta etapa del proceso de sondeo tiene como objetivo primordial proporcionar una evaluación inicial y global del impacto ambiental atmosférico generado por estas fuentes.

Esta metodología puede aplicarse de manera efectiva a fuentes puntuales elevadas, siempre y cuando los períodos de tiempo de las concentraciones medias calculadas estén dentro del rango de 15 minutos a 1 año. Al centrarse en estos intervalos de tiempo específicos, el procedimiento de sondeo puede ofrecer una visión más precisa del impacto a corto y largo plazo de las emisiones gaseosas.

Es particularmente útil en el caso de contaminantes para los cuales las normas de calidad del aire a corto plazo son determinantes para el cumplimiento de las normativas a largo plazo. Por ejemplo, cuando el cumplimiento de las normas a corto plazo garantiza automáticamente el cumplimiento de las normas a largo plazo. Las fuentes elevadas, es decir, aquellas que se encuentran a cierta altura sobre el suelo, se benefician especialmente de este enfoque.

Cuando se aplica este procedimiento a fuentes puntuales elevadas, se supone que se cumplen las siguientes condiciones:

- a) No existe remoción de los contaminantes.
- b) La pluma de contaminantes no impacta sobre terreno elevado.

El procedimiento de sondeo simple, también conocido como Etapa I, se encarga de calcular la concentración media horaria máxima de contaminantes en el aire a nivel del suelo, realizando una serie de pasos para obtener una estimación precisa.

En los primeros seis pasos, se calculan las concentraciones medias máximas para cada hora del día. Luego, para obtener concentraciones medias máximas para otros períodos de tiempo, los valores medios horarios obtenidos en los pasos anteriores deben ser ajustados mediante factores de corrección adecuados en el séptimo paso.

En el octavo paso, si es necesario, se agrega la concentración de fondo, que es la concentración de contaminantes presente en ausencia de la fuente emisora en cuestión. Finalmente, en el noveno paso, se compara la concentración total estimada con el 30% del valor del límite máximo admisible establecido por el Decreto N° 1074/18 de la Ley N° 5965. Este último paso permite determinar si la concentración de contaminantes supera el umbral permitido por la normativa vigente.

En la Resolución 559/19 se detallan cada uno de los pasos del procedimiento junto con las ecuaciones correspondientes. Este método es diseñado para ser ejecutado de manera sencilla, sin necesidad de utilizar modelos complejos o software especializado. De hecho, puede llevarse a cabo fácilmente utilizando una calculadora estándar o con el apoyo de un sistema de hojas de cálculo como Excel, o desarrollando los pasos en código Visual basic para otros entornos como Access.

La simplicidad y accesibilidad de este procedimiento lo hacen especialmente práctico para su aplicación en diversos contextos, ya que no requiere de recursos tecnológicos avanzados. Esto permite que pueda ser implementado por una variedad de profesionales y técnicos ambientales, facilitando la evaluación y el monitoreo de las concentraciones de contaminantes en el aire de manera eficiente y precisa.

La simplicidad del procedimiento descrito en la Resolución 559/19 lo hace ideal para aplicaciones en situaciones donde se requiere calcular el impacto de un número reducido de conductos, como en el caso de pequeños y medianos generadores de efluentes gaseosos.

En entornos donde el número de fuentes de emisión es limitado y las condiciones atmosféricas y topográficas lo permiten, este método proporciona una herramienta eficaz y accesible para evaluar el impacto ambiental de manera rápida y precisa. Su enfoque directo y la facilidad de implementación lo convierten en una opción práctica para empresas, consultores ambientales y autoridades regulatorias que necesitan realizar evaluaciones de impacto ambiental de manera regular.

Además, al no depender de modelos complejos o software especializado, este procedimiento puede ser utilizado por personal técnico con conocimientos básicos en evaluación ambiental, lo que lo hace aún más versátil y adaptable a una variedad de contextos y necesidades.

## Ejemplo de aplicación Ilustrativa de la ETAPA I de sondeo simple:

A continuación, se va a describir cada uno de los pasos de la etapa 1 de sondeos simple para posteriormente visualizarlo mediante el uso y configuración en Access mediante código Visual Basic.

### 1° Paso

Estimación de la elevación normalizada de la pluma de contaminantes ( $uDh$ ) que es aplicable a fuentes que emiten contaminantes a la atmósfera durante condiciones atmosféricas inestables y neutras. Las condiciones estables no son explícitamente consideradas en este procedimiento de sondeo simple debido a que el mismo no debe ser utilizado con fuentes de emisión cuya altura efectiva es menor que 10 m o casos en los que hay intercepción de la pluma con el terreno.

Primero, se calculará el parámetro de empuje térmico ( $F_b$ )

$$F_b = g V_s d_s^2 \left( \frac{T_s - T_a}{4T_s} \right)$$

donde:  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/seg^2$ )

La elevación normalizada de la pluma de contaminantes ( $uDh$ ) se obtiene de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{a) Si } F_b < 55 m^4 / s^3 &\Rightarrow uDh(m^2 / s) = 21.4 F_b^{3/4} \\ \text{b) Si } F_b \geq 55 m^4 / s^3 &\rightarrow uDh(m^2 / s) = 38.7 F_b^{3/4} \end{aligned}$$

### 2° Paso

El valor de  $uDh$  obtenido mediante las ecuaciones (4) o (5) debe ser dividido por cada una de las cinco velocidades del viento, ( $u = 1.0, 2.0, 3.0, 5.0$  y  $10.0$  m/s) para obtener la elevación de la pluma de contaminantes correspondiente a cada velocidad del viento:

$$Dh = \frac{uDh}{u}$$

Si  $T_s < T_a$  o el conducto posee sombrerete debe considerarse  $Dh = 0$

### 3° Paso

La obtención de la altura efectiva de la emisión ( $h_e$ ) se realizará para cada una de las velocidades del viento utilizadas, ( $u = 1.0, 2.0, 3.0, 5.0$  y  $10.0$  m/s), sumando la elevación de la pluma de contaminantes ( $Dh$ ) a la altura de la chimenea o conducto considerado ( $h_{ch}$ ):

$$h_e = h_{ch} + Dh$$

### 4° Paso

Para cada altura efectiva de emisión obtenida en el 3er. paso se calculan los valores de  $[Cu/Q]$  utilizando la siguiente expresión:

$$Cu/Q = 0.0414 \cdot h_e^{1.5}$$

### 5° Paso

Se divide cada valor de  $[Cu/Q]$  por la velocidad del viento respectivo para determinar los valores correspondientes de  $[C/Q]$ :

$$\frac{C}{Q} = \frac{Cu/Q}{u}$$

### 6° Paso

Se multiplica el valor máximo de la concentración dividido por  $Q$  obtenido en el 5to. paso por el caudal másico de emisión ( $Q$ ) (mg/s) y se incorpora el factor 2 como margen de seguridad para obtener la concentración media horaria máxima a nivel del suelo ( $C_1$ ) (mg/m<sup>3</sup>) originada por los contaminantes emitidos desde la chimenea considerada:

$$C_1 = 2 \cdot Q \cdot C/Q$$

El margen de seguridad (factor 2) es incorporado en el procedimiento de sondeo simple para tener en cuenta las inexactitudes inherentes a la estimación de la concentración obtenida mediante el cálculo de este tipo.

Si se considera más de una chimenea es necesario aplicar este procedimiento separadamente a cada una de ellas. Luego, los valores de la concentración media horaria máxima de contaminantes en aire a nivel del suelo obtenidos para cada chimenea deben ser sumados y la concentración media horaria máxima debida a todas las fuentes en estudio es obtenida.

### 7° Paso

Para encontrar la concentración media para un período de tiempo mayor que 1 hora se debe multiplicar la concentración media horaria máxima debida a todas las fuentes en estudio por el factor de corrección que corresponda según lo siguiente:

$$C_{15min:t} = 1.5 \cdot C_{1h:t}$$

$$C_{3h:t} = 0.9 \cdot C_{1h:t}$$

$$C_{8h:t} = 0.7 \cdot C_{1h:t}$$

$$C_{24h:t} = 0.4 \cdot C_{1h:t}$$

$$C_{3meses:t} = 0.12 \cdot C_{1h:t}$$

$$C_{1año:t} = 0.08 \cdot C_{1h:t} \quad ($$

### 8° Paso

Como las concentraciones calculadas se comparan con el 30% del límite máximo admisible de calidad de aire, las concentraciones calculadas deben dividirse por 0,30.

### 9° Paso

A continuación, en caso de corresponder, deben incorporarse las concentraciones para cada contaminante y período de tiempo establecidos en el Decreto N° 1074/18 debidas a otras fuentes o concentraciones "de fondo" ( $C_b$ ), de tal manera que la concentración total estimada ( $C_{máx}$ ) (mg/m<sup>3</sup>) queda:

$$C_{máx} = C_p + C_b$$

Si las concentraciones así calculadas son inferiores al límite máximo admisible de calidad de aire establecidos en el Decreto N° 1074/18 y Resoluciones dictadas en consecuencia, la fuente o fuentes de emisión estudiadas pueden ser consideradas ambientalmente adecuadas y no es necesario realizar un análisis posterior.

## Pasos configurados en Visual Basic para ACCESS

### A. Menú principal

Se detallan los campos asociados a la carga de los equipos generadores de emisiones gaseosas, sus conductos asociados, los resultados a calcular y una opción para la impresión de los mismos. Figura 4.2

Además, puede observarse que no superior se detalla la información sobre el generador a evaluar es decir su razón social su localidad y el número interno de identificación.

**Registro de Emisiones por Conducto**  
**Sondeo Simple - Primera Etapa:**  
 Formulario Búsqueda de Empresa

**Buscar por**

N° de Expediente: 0000-000000/0000 Alc. 00

**Empresa Encontrada**

Razón Social: 000000  
 Localidad: Burzaco

**Operaciones**

☐ Carga de Equipos ☐ Resultados Sondeo Simple  
☐ Carga de Conductos ☐ Imprime Informe

Registro: 18069 de 19026

**Figura 4.2.** Menú principal de la Etapa 1 sondeo simple configurado en Visual Basic para Access

### B. Carga de equipos

En esta sección se identificarán todos los equipos generadores de emisiones gaseosas a la atmósfera en la columna 1 se identificación numéricamente Y de forma consecutiva, seguida de la descripción específica del equipo en este caso una caldera marca con ella seguida de un horno de fundición que se ubica en la sección A dentro de la industria y el horno es el número 7 respectivamente; a su vez se identifica el tipo de combustible utilizado para generar la combustión interna en el caso de la caldera y las operaciones de fundición en el caso del horno Figura 4.3

### Registro de Emisiones por Conducto

#### Sondeo Simple - Primera Etapa

Formulario Búsqueda de Empresa

**Buscar por**

N° de Expediente:

**Empresa Encontrada**

Razón Social:

Localidad:

Subformulario Carga de Conductos

|   | Equipo | Descripción        | Ubicación | Observaciones            |
|---|--------|--------------------|-----------|--------------------------|
|   | 1      | Caldera Gónera     | Sector A  | Operación Dual GN/Fuel O |
|   | 2      | Horno de Fundición | N°7       | Carbon de Coque          |
| * |        |                    |           |                          |

Registro: ◀◀ ◀ 2 ▶ ▶▶ ▶\* de 2

**Figura 4.3** carga de equipos y conductos asociados e identificación de tipo de combustible utilizado.

### C. Carga de conductos

Aquí se procederá a cargar las condiciones operativas de cada uno de los equipos generadores determinadas en sus conductos asociados cada registro irá acompañado de un id de identificación autonumérico y consecutivo seguido datos Propios de la fuente como ser la altura del conducto, el diámetro equivalente, la sección transversal de flujo, la temperatura de salida de los gases, la velocidad y caudal volumétrico asociado. (Las determinaciones termodinámicas de las condiciones operativas de cada conducto de emisión serán determinados a través de un monitoreo analítico sobre la fuente cuestión realizado por un laboratorio habilitado a tal fin).

Además, se identifica si el conducto posee o no un sombrerete asociado dado que es el dato necesario para el paso 1 del procedimiento de cálculo del empuje térmico el cual será anulados en caso de poseer sombrerete.

En este ejemplo solo fueron cargadas dos fuentes generadoras pero el procedimiento de carga puede extenderse de manera consecutiva en el botón final de cada registro se procederá a realizar la carga de cada 1 de los contaminantes asociados y su concentración es a la salida de la chimenea datos necesaria para procedimiento de cálculo. Figura 4.4.

**Registro de Emisiones por Conducto**  
**Sondeo Simple - Primera Etapa:**  
 Formulario Búsqueda de Empresa

**Buscar por**

N° de Expediente: 0000-000000/0000 Alc.00

**Empresa Encontrada**

Razón Social: 000000  
 Localidad: Burzaco

Subformulario Carga de Conductos

| # | Id Cond. | Altura | Diám. | Secc.    | Temp. | Vel. | Q vol.  | Somb.                               | Observaciones/ Eq. Asoc. |
|---|----------|--------|-------|----------|-------|------|---------|-------------------------------------|--------------------------|
| 1 | 1        | 10     | 0.25  | 0.049087 | 372   | 1.5  | 0.07363 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1                        |
| 2 | 2        | 15     | 0.5   | 0.19635  | 650   | 3.5  | 0.68722 | <input type="checkbox"/>            | 2                        |
| * |          | 0      | 0     | 0        | 0     | 0    | 0       | <input type="checkbox"/>            |                          |

Registro: 2 de 2

**Figura 4.4** carga de las condiciones operativas de cada uno de los conductos generadores de emisiones gases a la atmósfera.

#### D. Carga de contaminantes asociados a cada una de las fuentes generadoras

La carga de los contaminantes de cada una de las fuentes estará directamente relacionada con las operaciones desarrolladas por el equipo generador en este caso observamos los gases de combustión cuando opera a gas natural identificados para caldera tipo Bonilla y determinados a través de un monitoreo en su fuente de emisión.

**Registro de Emisiones por Conducto**  
**Sondeo Simple - Primera Etapa:**  
 Formulario Carga de Emisiones

Emisiones del conducto de referencia:

|   | Contaminante        | Caudal | Ce     | CNe    | Concentración Calculada |
|---|---------------------|--------|--------|--------|-------------------------|
| ▶ | Monóxido de Carbono | 8.5    | 115.44 | 157.22 | 0.074187033907550       |
|   | Dióxido de Azufre   | 0.1    | 1.3581 | 1.8496 | 0.0008727886342064      |
|   | NO2 E3              | 21     | 285.21 | 388.42 | 0.18328561318335        |
| * |                     |        |        |        |                         |

**Figura 4.5.** Carga de las concentraciones analíticas para cada 1 de los contaminantes asociados a la fuente de emisión en estudio.

Los contaminantes se identifican como monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno se procede a ingresar el caudal másico determinado para cada uno

de estos contaminantes, como ser la concentración en miligramos sobre metro cúbico a la temperatura de salida de la fuente de emisión y la concentración normalizada en emisión (0° y una atmósfera).

En la última columna se identifican las concentraciones en inmisión diferenciadas por contaminante para un periodo de una hora (dato necesario para la integración según paso 6 para múltiples fuentes de emisión). Figura 4.5.

En este procedimiento se podrá cargar la totalidad de los contaminantes generados por fuente. En la figura 6 observamos cómo para el horno de fundición no solo tendremos los gases de combustión propios de la combustión del carbón de coque, sino que también se identifica al material particulado tanto de 10 como de 2,5 micrómetros generado dado el combustible sólido utilizado (carbón de coque). Figura 4.6.

Además, en función del tipo de operaciones generadas en el horno de la fundición se podrían identificar distintos tipos de metales pesados asociados.

**Registro de Emisiones por Conducto**  
**Sondeo Simple - Primera Etapa:**  
 Formulario Carga de Emisiones  
 Emisiones del conducto de referencia:

|   | Contaminante             | Caudal | Ce     | CNe    | Concentración Cal |
|---|--------------------------|--------|--------|--------|-------------------|
|   | Dióxido de Azúfre        | 350    | 509.3  | 1211.9 | 0.39367964757     |
|   | NO2 E0                   | 20     | 29.103 | 69.254 | 0.022495979861    |
|   | PM-2.5 E3                | 35     | 50.93  | 121.19 | 0.039367964757    |
| ▶ | Material Particulado Sus | 60     | 87.308 | 207.76 | 0.067487939584    |

**Figura 4.6** contaminantes asociados a la fuente del horno de fundición

## E. Resultados finales

Luego de realizar secuencialmente la carga de todos los equipos generadores de emisiones de gaseosas su correspondiente conductos asociados y sus variables termodinámicas y caudales y concentraciones encontradas para cada 1 de los contaminantes asociados a las operaciones desarrolladas por estos equipos se procederá a realizar el cálculo final para la determinación de la concentración en inmisión de cada 1 de estos contaminantes de forma integral y diferenciada por su periodo de tiempo regulado.

Es decir, el modelo determinará las la concentración media horaria máxima de contaminantes en aire a nivel del suelo en emisión para un periodo de 1 hora (paso 6) y realizará según las estimaciones del paso 7 la extrapolación a otros periodos de tiempo.

Luego se comparan los valores encontrados con el 30% de los valores normados o de forma equivalente multiplicará las concentraciones encontradas. Figura 4.7.

| Empresa: 000000                           |                        | Localidad: Burzaco |            |              |             |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
|-------------------------------------------|------------------------|--------------------|------------|--------------|-------------|------|--------|------|--------|-------|--------|------|--------|-------|
| Expediente: 0000-000000/0000 Aic.00       |                        |                    |            |              |             |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| Emisiones por conducto:                   |                        |                    |            |              |             |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| Conducto                                  | Contaminante           | Q (mg/s)           | Ce (mg/m3) | CNe (mg/Nm3) | Le (mg/Nm3) |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| 1                                         | NO2 E3                 | 21                 | 285.20499  | 388.44600    | 0           |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| 1                                         | Dióxido de Azufre      | 0.1                | 1.3581190  | 1.8497429    | 500         |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| 1                                         | Monóxido de Carbono    | 8.5                | 115.44012  | 157.22814    | 100         |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| 2                                         | Material Particulado S | 60                 | 87.307650  | 207.77642    | 250         |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| 2                                         | PM-2.5 E3              | 35                 | 50.929463  | 121.20291    | 0           |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| 2                                         | NO2 E3                 | 20                 | 29.102550  | 69.258806    | 0           |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| 2                                         | Dióxido de Azufre      | 350                | 509.29463  | 1212.0291    | 500         |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| 2                                         | Monóxido de Carbono    | 200                | 291.02550  | 692.58806    | 100         |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| Calidad de Aire por contaminante emitido: |                        |                    |            |              |             |      |        |      |        |       |        |      |        |       |
| Contaminante                              | C 15m                  | L 15m              | C 1h       | L 1h         | C 3h        | L 3h | C 8h   | L 8h | C 24h  | L 24h | C 3m   | L 3m | C 1a   | L 1a  |
| Dióxido de Azufre                         | 0.5918                 | 0                  | 0.3946     | 0            | 0.3551      | 1.3  | 0.2762 | 0    | 0.1578 | 0.365 | 0.0473 | 0    | 0.0316 | 0.08  |
| Material Particulado S                    | 0.1012                 | 0                  | 0.0675     | 0            | 0.0607      | 0    | 0.0472 | 0    | 0.027  | 0.15  | 0.0081 | 0    | 0.0054 | 0.05  |
| Monóxido de Carbono                       | 0.4487                 | 0                  | 0.2991     | 40.082       | 0.2692      | 0    | 0.2094 | 10   | 0.1197 | 0     | 0.0359 | 0    | 0.0239 | 0     |
| PM-2.5 E3                                 | 0.0591                 | 0                  | 0.0394     | 0            | 0.0354      | 0    | 0.0276 | 0    | 0.0157 | 0.025 | 0.0047 | 0    | 0.0031 | 0.012 |
| NO2 E3                                    | 0.3087                 | 0                  | 0.2058     | 0.188        | 0.1852      | 0    | 0.1440 | 0    | 0.0823 | 0     | 0.0247 | 0    | 0.0165 | 0     |

**Figura 4.7** resumen final de los resultados obtenidos luego de la aplicación de la etapa 1 sondeo simple para fuentes hipotéticas de generación de emisiones gaseosas a la atmosfera asociadas a una caldera gas natural y horno de fundición.

Finalmente, cada una de las concentraciones encontradas se le deberán sumar las concentraciones de fondo determinadas en la zona de influencia de las mismas según paso 9 a saber:

$$C_{\max} = C_p + C_b$$

En el reporte final se observa la identificación del generador de emisiones gaseosas con sus datos identificativos seguidas de un resumen de la información sobre las fuentes generadoras y sus contaminantes asociados, los caudales máxicos (mg/s) concentraciones encontradas (Ce), concentraciones normalizadas y los límites guía de emisión (establecidos a modo referencial) en todos los casos las unidades utilizadas estarán en miligramos sobre metro cúbico para cada uno de los contaminantes. E en la segunda sección del final se observan los resultados obtenidos para cada uno de los períodos de tiempo en inmisión y su correspondiente comparación legal para un límite específico regulado.

## Etapa II: Sondeo detallado

La etapa II, aunque sigue siendo de sondeo o "screening" o proyección, implica un nivel de detalle mayor que la etapa I. En esta fase, se requiere proporcionar una descripción concisa de la topología del terreno, indicando si se trata de un terreno urbano o rural, entre otros. Para esto, podemos referirnos a la metodología detallada en el Anexo III de la Resolución 559/19.

Además, si el generador de efluentes gaseosos está ubicado en una zona donde la presencia de costa o terreno complejo es relevante, es necesario especificar la ubicación y dimensiones de los espejos de agua cercanos, la altura y ubicación de las elevaciones cercanas, así como otras características geográficas determinantes para la elección del modelo a utilizar.

Asimismo, es crucial considerar la existencia de edificios cercanos, ya que estos pueden influir de manera significativa en el desarrollo de la pluma de emisiones, dependiendo de la relación entre su altura y su ancho.

Otro aspecto importante a considerar es la selección adecuada de receptores para garantizar un muestreo representativo de la zona de influencia. Se recomienda utilizar una grilla con un paso de 50 metros por lado en las áreas donde se espera una concentración máxima significativa. Esto asegurará una cobertura suficiente de receptores en esas áreas clave.

Es importante destacar que existen circunstancias particulares en las cuales será necesario considerar ubicaciones especiales para receptores, denominados "receptores críticos", para el cálculo de las concentraciones máximas esperadas. Estos receptores críticos juegan un papel fundamental en la evaluación de la calidad del aire y en la toma de decisiones respecto a medidas de control y mitigación. Por lo tanto, su ubicación precisa y su inclusión en el modelo debe ser considerado.

En cuanto a los receptores críticos, es esencial considerar la presencia de escuelas y jardines de infantes debido a la mayor susceptibilidad de los niños a la exposición a contaminantes ambientales. Los niños respiran más aire en relación a su peso corporal y aún están desarrollando su sistema de detoxificación, lo que los hace más vulnerables a los efectos adversos de la contaminación del aire.

Asimismo, la presencia de asilos de ancianos también debe ser tomada en cuenta, dado que las personas mayores tienen un sistema de defensa y detoxificación del organismo en deterioro, lo que los hace más susceptibles a los efectos nocivos de los contaminantes ambientales.

La presencia de hospitales también es un factor importante para considerar, ya que los pacientes de estos establecimientos pueden estar especialmente susceptibles a la presencia elevada de contaminantes debido a las condiciones médicas que están enfrentando.

Además, es relevante tomar en cuenta las zonas con denuncias de vecinos y/o judicializadas al realizar análisis, ya que pueden indicar problemas ambientales significativos que deben ser investigados y abordados adecuadamente.

Por último, pero no menos importante, es fundamental definir qué tipo de estudio se está llevando a cabo y qué valores específicos se necesitan conocer. Esto permitirá orientar la recopilación y análisis de datos de manera más precisa y efectiva para evaluar los riesgos ambientales y tomar medidas apropiadas de control y mitigación.

Por lo tanto, en la Etapa II se deben refinar y actualizar los datos sobre la topografía, así como realizar una revisión minuciosa de la distribución de receptores y edificaciones cercanas. Esto permitirá una evaluación más precisa de los riesgos para la salud y el ambiente, así como la identificación de medidas de control y mitigación apropiadas.

En este sentido, el modelo screen view es ampliamente utilizado en la gestión de la Provincia de Buenos Aires como se describe en el capítulo 4 del libro “Modelos de dispersión y distribución de contaminantes en el ambiente” (Massolo, 2022)

El modelo Screen View, aunque originalmente diseñado para una sola fuente, puede ser adaptado para manejar múltiples fuentes mediante el uso del parámetro de Merge. Se aplica a fuentes puntuales estacionarias que no distan más de 100 m entre sí y cuyos parámetros no difieren más de 80 %. Este parámetro permite identificar la fuente más representativa entre todas, asumiendo que las concentraciones de contaminantes de las otras fuentes pueden sumarse a esta fuente principal.

$$M = (h_{ch} \times V \times T_s) / Q$$

$h_{ch}$  = altura de la fuente (m)

$V$  = caudal (m<sup>3</sup>/s)

$T_s$  = temperatura de salida (°K)

$Q$  = caudal másico (g/s)

La chimenea que se toma como representativa será la de  $< M$

De esta manera, el modelo puede proporcionar una estimación precisa de la inmisión de contaminantes, incluso en escenarios donde hay varias fuentes cercanas con características similares. Esto lo convierte en una herramienta versátil y útil para evaluar la dispersión de contaminantes en situaciones donde las fuentes son múltiples, pero no necesariamente diferentes entre sí.

Otro modelo utilizado para un sondeo detallado es el AERSCREEN de la EPA de EE. UU. y los programas de modelado asociados.

AERSCREEN estima los peores impactos de las concentraciones a nivel del suelo para una sola fuente interactuando con el modo de detección del modelo AERMOD (ETAPA III). Los escenarios pueden incluir terreno simple o complejo, deslave de edificios y química de NO<sub>2</sub>.

Con AERSCREEN View, los usuarios pueden realizar ejecuciones de modelos simultáneas para una variedad de tipos de fuentes y escenarios. El Asistente de escenario facilita la creación y administración de entradas para diferentes escenarios a modelar. El programa también contiene muchas opciones de visualización atractivas para la salida de modelos, incluidos formatos de texto, gráficos y tabulares. El modelado preliminar con AERSCREEN View puede eliminar la necesidad de un modelado más complicado, ahorrando tiempo y recursos.

A diferencia del SCREEN3, el modelo AERSCREEN consta de dos componentes principales: 1) el programa MAKEMET que genera una matriz de condiciones meteorológicas específica del sitio para ingresar al modelo AERMOD; y 2) posee los submódulos de AERMAP (US EPA, 2018) y BPIPPRM (Schulman et al. 2000; US EPA, 2004) para automatizar el procesamiento de información del terreno y evaluación de los edificios cercanos respectivamente, e interactúa con el Modelo AERMOD utilizando la opción SCREEN para realizar las ejecuciones de modelado.

También incluye factores de tiempo promedio para los peores casos de 3 horas, 8 horas, 24 horas y promedios anuales.

Otra aplicación valiosa de los modelos tipo gaussiano es determinar la altura óptima de las chimeneas para garantizar la adecuada dispersión de los gases, especialmente en terrenos planos con una buena capacidad de dispersión. En este escenario, se emplea un enfoque iterativo donde se proponen alturas de chimenea y se calculan las concentraciones de inmisión mediante el modelo gaussiano. Si estas concentraciones no cumplen con las normas establecidas en el área donde se ubica el generador de emisiones gaseosas, se ajusta la altura de la chimenea y se repite el cálculo. Este proceso iterativo continúa hasta alcanzar la altura aproximada deseada que garantice niveles aceptables de concentración de contaminantes en el entorno. Esta metodología proporciona una herramienta efectiva para el diseño y la planificación de sistemas de dispersión

Para un mayor detalle sobre como iniciar una modelación mediante el modelo SCREEN3 (modelo ETAPA II) se recomienda al lector el libro de cátedra Modelos de dispersión y distribución de contaminantes en el ambiente 2022 capítulo 4 en la sección Aplicaciones de modelos gaussianos- Modelación mediante modalidad screening, donde se brinda una descripción detallada para la ejecución del modelo y procedimiento de descarga e instalación.

### **Etapas III: Modelación detallada**

En la Resolución 559/19 de la Provincia de Buenos Aires se detallan las características principales correspondientes a una modelación detallada, como las distintas clases de estabilidad atmosférica, la selección de la topografía y la construcción de la grilla de receptores. Estos elementos son fundamentales para llevar a cabo un análisis exhaustivo de la dispersión

de contaminantes en el aire y evaluar los posibles impactos en la calidad del aire y la salud humana.

La consideración de las diferentes clases de estabilidad atmosférica permite capturar la variabilidad de las condiciones meteorológicas que pueden influir en el transporte y la dispersión de contaminantes. Asimismo, la selección adecuada de la topografía es crucial para representar con precisión el entorno geográfico en el que se desarrolla el proceso de dispersión.

La construcción de la grilla de receptores es otro aspecto esencial, ya que determina la ubicación de los puntos de monitoreo donde se evaluarán las concentraciones de contaminantes. La distribución óptima de estos receptores garantiza una cobertura adecuada del área de estudio y una captura representativa de los datos necesarios para el análisis.

En resumen, la Resolución 559/19 establece pautas específicas para la realización de modelaciones detalladas en la Provincia de Buenos Aires, asegurando que se consideren todos los aspectos relevantes para obtener resultados precisos y confiables en la evaluación de la calidad del aire y la gestión de riesgos ambientales.

Asimismo, presenta varias opciones de modelos que pueden aplicarse para esta tercera etapa, muchos de los cuales no son utilizados en la actualidad. Entre las diversas opciones de modelos de dispersión atmosférica con la complejidad de una modelación detallada, el modelo AERMOD destaca como uno de los más preferidos y ampliamente utilizados, especialmente por la Agencia Ambiental de Estados Unidos (US-EPA, 2024), así como por muchas otras agencias ambientales en todo el mundo. El modelo AERMOD es un modelo de pluma en estado estacionario que incorpora la dispersión del aire basada en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria y conceptos de escala, incluido el tratamiento de fuentes superficiales y elevadas, así como de terrenos simples y complejos. Este enfoque permite una representación más precisa y detallada de la dispersión de contaminantes en la atmósfera, teniendo en cuenta las características específicas del entorno y las condiciones meteorológicas locales.

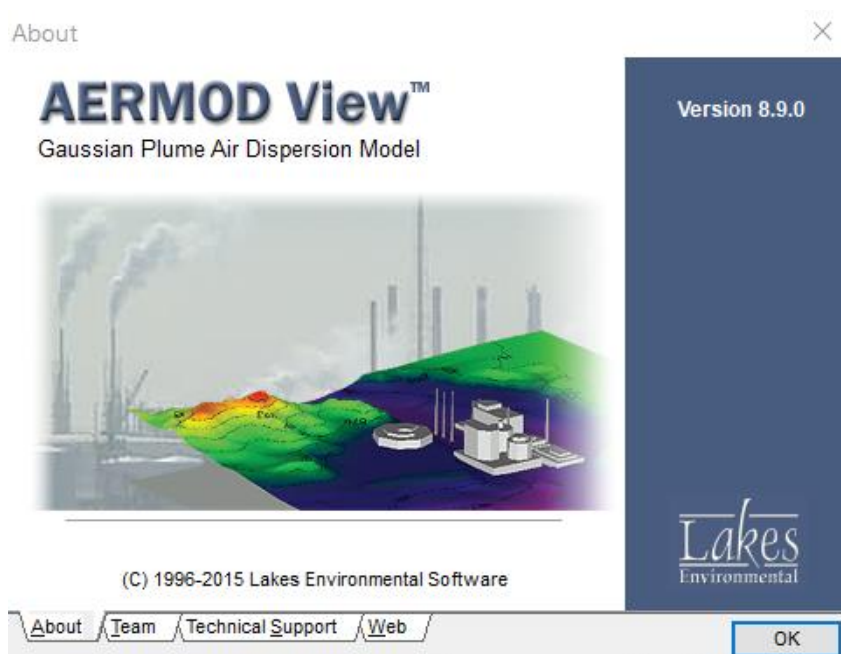
AERMOD es valorado por su capacidad para simular simultáneamente múltiples fuentes de emisión con diversas formas y características, ya sean en el suelo o elevadas, flotantes o no flotantes, y que emiten uno o más contaminantes. Esto proporciona una flexibilidad importante para abordar una amplia gama de escenarios de emisión en entornos industriales, urbanos y rurales.

Una de las características destacadas de AERMOD es su capacidad para tener en cuenta la estructura vertical no homogénea de la capa límite atmosférica. Esto se logra mediante el uso de un perfil vertical de variables meteorológicas, lo que permite una representación más precisa de la dispersión de contaminantes en diferentes altitudes. Esta capacidad mejora la precisión de las predicciones del modelo en una variedad de condiciones atmosféricas y topográficas, lo que lo convierte en una herramienta invaluable para la evaluación y gestión de la calidad del aire.

## Sistema de modelado AERMOD

El Comité de Mejora del Modelo Regulador (AERMIC) de la Sociedad Meteorológica Estadounidense/Agencia de Protección Ambiental se formó para introducir conceptos de modelado de última generación en los modelos de calidad del aire de la EPA. A través de AERMIC, se introdujo un sistema de modelado, AERMOD, que incorporaba la dispersión de aire basada en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria y conceptos de escala, incluido el tratamiento de fuentes superficiales y elevadas, y de terrenos simples y complejos. A partir del 9 de diciembre de 2006, AERMOD está plenamente operativo en reemplazo de ISC3.

Hay dos procesadores de datos de entrada que son componentes regulatorios del sistema de modelado AERMOD: AERMET, un preprocesador de datos meteorológicos que incorpora dispersión de aire basada en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria y conceptos de escala, y AERMAP, un preprocesador de datos de terreno que incorpora terreno complejo datos de elevación digitales. Otros componentes no regulatorios de este sistema incluyen AERSCREEN la una versión de detección de AERMOD; AERSURFACE, un preprocesador de características de superficie, y BPIP PRIM, un programa de dimensiones de múltiples edificios que incorpora los procedimientos técnicos.

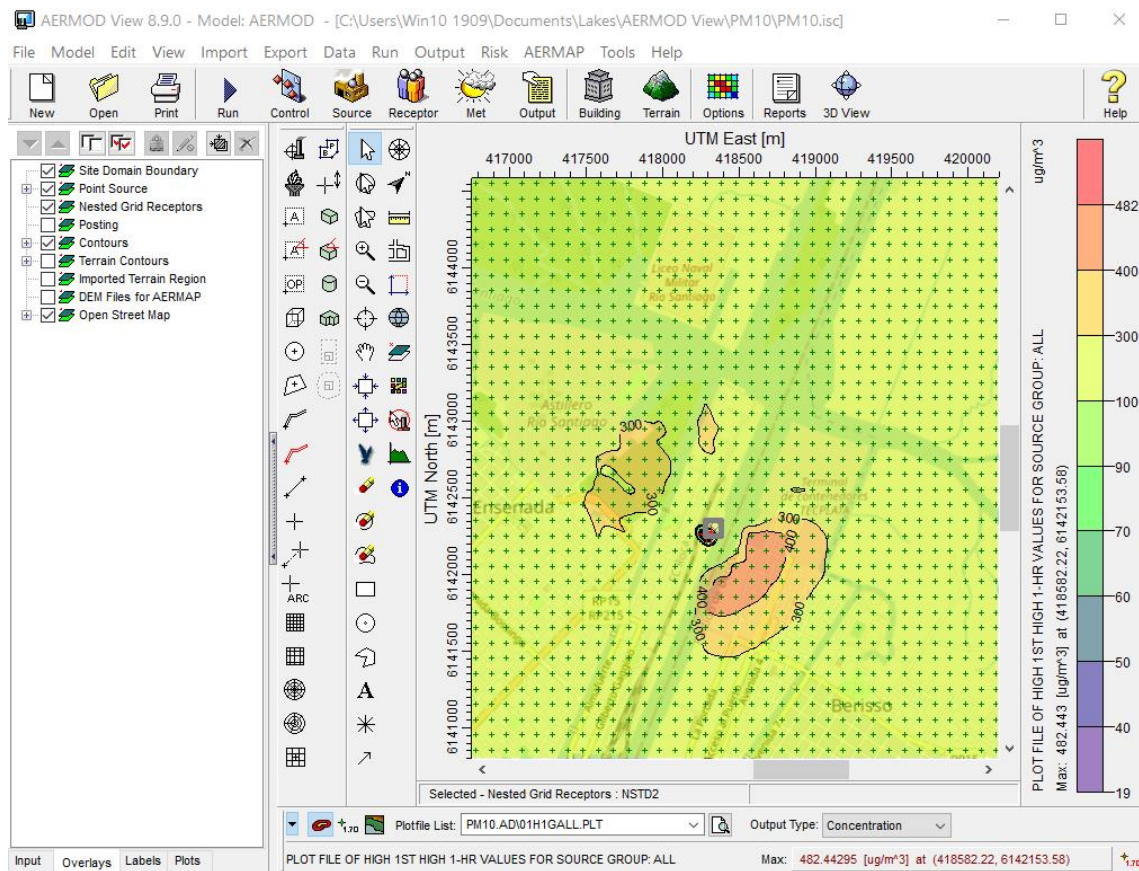


**Figura 4.8.** Vista Pantalla de inicio del modelo AERMOD View versión de la empresa Lakes Environmental Software

En modelo AERMOD permite calcular y generar la concentración promedio acumulada (de todos los tipos de fuentes generadoras) modelado con contribuciones del grupo de fuentes y la concentración promedio acumulada máxima (todas las fuentes) de por receptor definido.

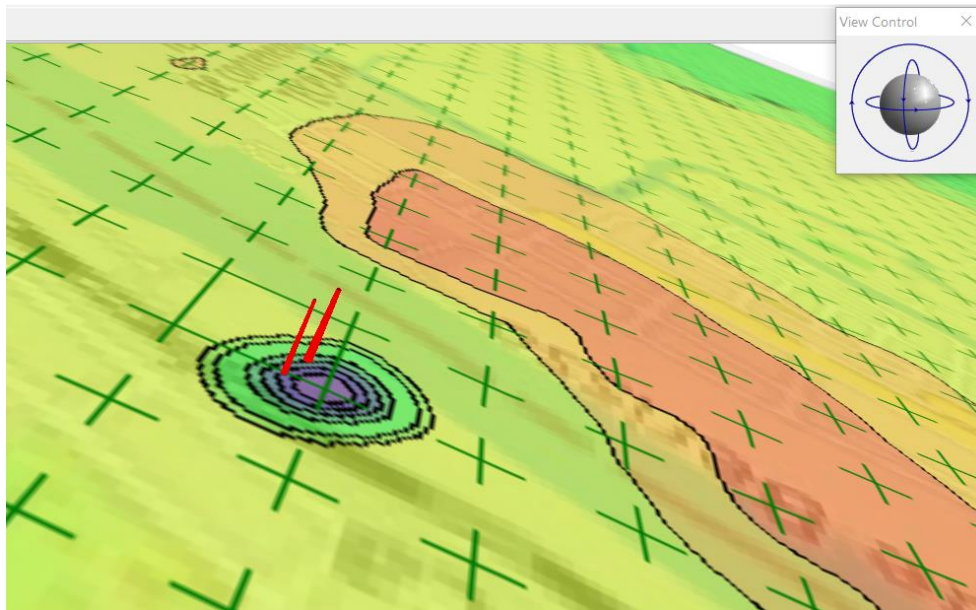
*Figura 4.9. Menú Principal de navegación en el software AERMOD donde se observa el trabajo desarrollado para la evaluación del impacto del material particulado PM10 para un sitio en particular.*

A la izquierda de la figura 4.9 se observan las diferentes herramientas de trabajo para la edición y carga de datos y a la derecha una escala de concentración de los máximos obtenidos detallados.



*Figura 4.9. Menú principal y detalle de concentraciones determinadas y proyectadas en isólinas de concentración. Donde se observa el trabajo desarrollado para la evaluación del impacto del material particulado PM10 para un sitio en particular.*

El modelo también nos permite realizar visualizaciones en 3D del trabajo parcial desarrollado o completado como se observa en la Figura 4.10 donde se observan las fuentes de emisión, los puntos receptores y las isolíneas de concentración.



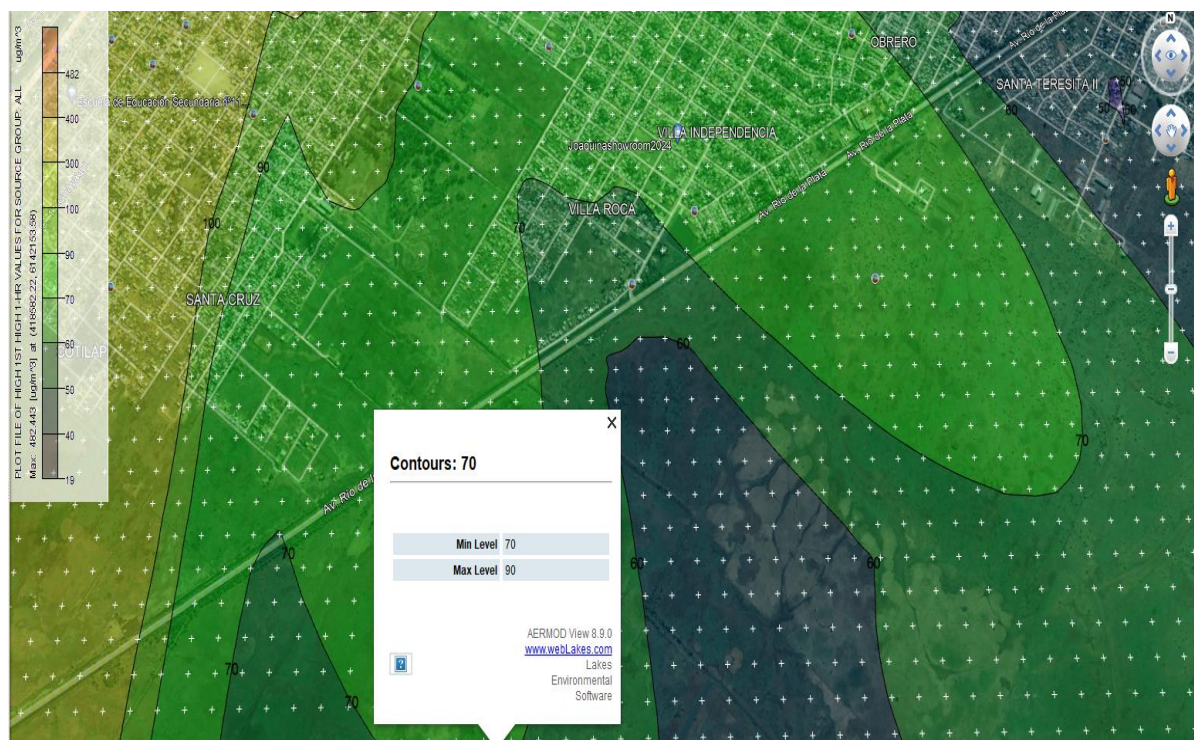
**Figura 4.10** Representación en 3D del trabajo desarrollado

A continuación, se representa las grillas de receptores, su visualización y representación sobre la superficie georreferenciada del entorno de modelación. Figura 4.11



**Figura 4.11:** Grilla de receptores con paso de 50 metros

Sobre la grilla anterior se calculan las máximas concentraciones para el analito y periodo evaluado y se representan las isolíneas de concentración Figura 4.12



**Figura 4.12.** *Isolíneas de concentración, rango de escalas e identificación de concentraciones en puntos seleccionados*

Todos los detalles gráficos se encuentran acompañados de archivos de texto para su exportación y confección de informes además de brindar el soporte de los trabajos realizados detallando las condiciones de modelación.

El modelo AERMOD ofrece una combinación única de precisión, flexibilidad y capacidad de representación que lo convierte en una herramienta muy útil para la evaluación y gestión de la calidad del aire en una amplia variedad de entornos y aplicaciones. Además, la capacidad del modelo para considerar una variedad de condiciones y configuraciones hace que sea una herramienta versátil y robusta para estudios de impacto ambiental y planificación urbana. Es una herramienta que proporciona a los investigadores, organismos de control y profesionales ambientales una forma precisa de estimar los impactos de las emisiones contaminantes en el ambiente y la salud humana.

## Bibliografía

USEPA. (2024, 2 de mayo). *Air quality dispersion modelling*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling#:~:text=Dispersion%20modeling%20uses%20mathematical%20formulations,at%20selected%20downwind%20receptor%20locations>

United States Environmental Protection Agency. (s.f.). *Guía del usuario de AERSCREEN*. Oficina de Normas y Planificación de la Calidad del Aire, División de Evaluación de la Calidad del Aire, Grupo de Modelización de la Calidad del Aire, Research Triangle Park, Carolina del Norte.

United States Environmental Protection Agency. (s.f.). *AERMOD implementation guide*. Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Assessment Division, Research Triangle Park, NC.

Massolo, L. (2015). *Introducción a las herramientas de gestión ambiental*. SEDICI, Universidad Nacional de La Plata.

Massolo, L. (2022). *Modelos de dispersión y distribución de contaminantes en el ambiente*. SEDICI, Universidad Nacional de La Plata.

Provincia de Buenos Aires. (2024, 2 de mayo). *Decreto 1074/2018 de la Dirección Ejecutiva del Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS)*. <https://normas.gba.gob.ar/ar-b/decreto/2018/1074/17866>

Provincia de Buenos Aires. (2024, 2 de mayo). *Resolución 559/2019 de la Dirección Ejecutiva del Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS)*. Sistema de Información Normativa y Documental. <https://normas.gba.gob.ar/ar-b/resolucion/2019/559/208176>

Bajano, H. (2006). *Guía para los ensayos en chimenea*. Centro Atómico Constituyentes. ISBN 987-43-6802-0

## Los autores

### Massolo, Laura Andrea

Doctora en Ciencias Exactas por la Facultad de Ciencias Exactas (FCE), Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Bioquímica por la FCE-UNLP y Farmacéutica y Licenciada en Ciencias Farmacéuticas, FCE-UNLP.

Profesora adjunta de las asignaturas *Modelos de Dispersión y Distribución de Contaminantes, Gestión y Diagnóstico Ambiental y Contaminación Ambiental y Salud*, FCE-UNLP. Profesora de la asignatura de posgrado *Evaluación y Tratamiento de la Contaminación del Aire*, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Universidad Católica Argentina (UCA).

Directora de la Dirección de Evaluación Ambiental de Calidad de Aire y Gestión de Emisiones del Ministerio de Ambiente de la Provincia de Bs As. Vicepresidenta de la Comisión Revisora Permanente del Decreto Reglamentario 1074/18 (PBA), representante de la provincia de Buenos Aires en la Comisión de Calidad de Aire del ACUMAR y en la Comisión de Aire del IRAM.

Investigadora en el Centro de Investigaciones del Medio Ambiente (CIM), UNLP-CIC-CONICET. Ha participado en cursos de posgrado sobre temas ambientales tanto en el ámbito universitario como en otros ámbitos profesionales.

Autora de 23 trabajos originales en revistas científicas y capítulos de libros, y presentó 44 trabajos en congresos nacionales e internacionales relacionados con la calidad del aire. Participó en la redacción del *Manual Nacional de Inspectores Ambientales* (2011 y 2017).

Autora y coordinadora de los libros *Introducción a las Herramientas de Gestión Ambiental* (2015, Editorial EDULP) y *Modelos de Dispersión y Distribución de Contaminantes en el Ambiente* (2022, Editorial EDULP).

Ha elaborado informes técnicos y anteproyectos legislativos sobre calidad del aire en la provincia de Buenos Aires. Participó en más de 20 proyectos de investigación y extensión relacionados con contaminación atmosférica y riesgos asociados, incluyendo proyectos de cooperación internacional Argentina-Alemania.

### Castagnasso, Germán Héctor

Técnico en Industrias de Procesos. Actualmente finalizando la carrera de Licenciatura en Química y Tecnología Ambiental, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

Docente ayudante de las materias *Modelos de Dispersión y Distribución de Contaminantes, Gestión y Diagnóstico Ambiental, Ecotoxicología y Evaluación de Riesgo, Química Ambiental y Contaminación Ambiental y Salud*, FCE-UNLP.

Coordinador de la Dirección de Evaluación Ambiental de Calidad de Aire y Gestión de Emisiones del Ministerio de Ambiente de la Provincia de Buenos Aires (PBA), donde participó en el desarrollo del Centro de Monitoreo de la Calidad del Aire (CEMCA), sistemas internos para la gestión de emisiones y la calidad del aire, y aspectos normativos, como el Decreto 1074/18 y la Resolución 559/19. Ha dictado capacitaciones para agentes ambientales y fiscalizadores.

Colaborador en proyectos de investigación y extensión relacionados con la contaminación atmosférica en el Centro de Investigaciones del Medio Ambiente (CIM), UNLP. Participó como autor en el *Manual Nacional de Inspectores Ambientales* (2017) y en capítulos de los libros: *Introducción a las Herramientas de Gestión Ambiental* (2015, Editorial EDULP), *Calidad del Aire: Monitoreo y Modelado de Contaminantes Atmosféricos. Efectos en la Salud Pública* (2018, Editorial EDULP) y *Modelos de Dispersión y Distribución de Contaminantes en el Ambiente* (2022, Editorial EDULP).

Ha publicado trabajos sobre *Relaciones entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> en calidad de aire en Dock Sud, Provincia de Buenos Aires* (PRODECA, UTN, Bahía Blanca, septiembre 2017) y *Efectos de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y partículas finas sobre la salud infantil* (Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP, septiembre 2011).

Miembro de la Asociación de Profesionales y Técnicos para el Desarrollo Sustentable (APTEDes), de la Comisión Revisora Permanente del Decreto Reglamentario 1074/18, y representante por la Provincia de Buenos Aires en la Comisión de Calidad de Aire del ACUMAR, COMIREC y la Comisión de Aire del IRAM.

Massolo, Laura

Aplicación de modelos para la gestión y diagnóstico de problemáticas ambientales / Laura Massolo ; Germán Héctor Castagnasso ; Compilación de Laura Andrea Massolo. - 1a ed. - La Plata : Universidad Nacional de La Plata ; La Plata : EDULP, 2026.

Libro digital, PDF - (Libros de cátedra)

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-950-34-2721-7

1. Ambiente. I. Castagnasso, Germán Héctor II. Massolo, Laura Andrea, comp. III. Título.  
CDD 300

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP

Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata

48 N.º 551-599 / La Plata B1900AMX / Buenos Aires, Argentina

+54 221 644 7150

edulp.editorial@gmail.com

www.editorial.unlp.edu.ar

EduLP integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2026

ISBN 978-950-34-2721-7

© 2026 - EduLP