



INFORME FINAL SOBRE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO “DESARROLLO DE HERRAMIENTAS Y MÉTODOS PARA LA SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS POR PESTICIDAS EN LA COMUNIDAD VALENCIANA”.

El proyecto “DESARROLLO DE HERRAMIENTAS Y MÉTODOS PARA LA SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS POR PESTICIDAS EN LA COMUNIDAD VALENCIANA” ha estado financiado por la Dirección General de Ciencia e Investigación de la Generalitat Valenciana, a través de unas subvenciones para grupos de investigación consolidados– AICO 2022.

El objetivo general de este proyecto es implementar una metodología que permita interpretar y predecir el comportamiento de los pesticidas más habitualmente detectados en las aguas subterráneas del ámbito de la Comunidad Valenciana. La herramienta final, cuya implementación se basará en toda la información disponible en el territorio de la Comunidad Valenciana acerca del uso y aplicación de pesticidas, pretende ser lo suficientemente amplia y flexible para que, en el futuro, pueda utilizarse en la predicción de las concentraciones de los mismos u otros pesticidas en cualquier punto de dicho territorio. En otras palabras, se pretende preparar un marco de trabajo que facilite al usuario adiestrado a evaluar el destino y la concentración de un pesticida depositado en superficie, y valorar el riesgo de que se contaminen las aguas subterráneas.

Durante los dos primeros años de este proyecto se ha abordado la modelación matemática de cinco pesticidas en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ): Bromacil, Terbutilazina, Atrazina, Desetil-Terbutilazina y Terbumeton. Para ello, se utilizó el software PRZM5 (Pesticide Root Zone Model, versión 5) desarrollado por la Agencia Medioambiental de Estados Unidos (EPA). Mediante la aplicación de PRZM5 se simuló el movimiento de dichos pesticidas a través de la zona no saturada hasta su llegada a los acuíferos. El modelo se ha utilizado para estimar las concentraciones diarias de los pesticidas de 72 pozos de la DHJ. En estas masas de agua subterránea se han encontrado valores de concentración de plaguicidas superiores al valor Máximo de Concentración Permitido (MCP) establecido por la Legislación Española y que es igual a 0.1 µg/l. Estos resultados proporcionan un primer paso crucial para el desarrollo de la evaluación del riesgo de plaguicidas en la DHJ. A partir de estos resultados obtenidos se realizaron un conjunto de mapas de riesgo de contaminación, para tener una perspectiva de la evolución temporal de los pesticidas en las masas de agua subterránea de la DHJ. La distribución espacial de los pesticidas corresponde a zonas mayoritariamente dedicadas a la agricultura de regadío. Se puede concluir que la cantidad de pesticida aplicada en los cultivos es el factor más

importante que influye en la concentración de pesticida en las masas de agua subterránea. Además, otras variables que afectan son el tipo de suelo, la profundidad del acuífero, características hidrometeorológicas, y el índice de persistencia de los pesticidas. Este trabajo ejemplifica que la aplicación del modelado matemático es una herramienta válida para el análisis y predicción del destino y transporte de pesticidas en los suelos y en las aguas subterráneas, por lo que su incorporación a la gestión ambiental podría beneficiar a la toma de decisiones sobre los recursos hídricos. Lo comentado arriba se ha visto plasmado en la publicación de un artículo científico (que olvidamos presentar junto al informe del año anterior) y en la presentación de una tesis doctoral los cuales se adjuntan al presente documento. En ellas se puede apreciar con detalle las actividades desarrolladas en relación con este proyecto. Además, uno de los investigadores principales ha impartido un curso relacionado con los objetivos del proyecto.

En los trabajos desarrollados en los 2 primeros años del proyecto (que fueron realmente 14 meses), el equipo de investigación consiguió familiarizarse con el código PRZM5 y así modelizar la evolución de la concentración de los pesticidas en cualquier localización deseada. La herramienta principal ya estaba controlada. En este tercer año de proyecto, el objetivo fue la extensión del análisis local antes comentado a un área determinada para obtener estimadores de la concentración en cualquier punto de dicho área e indicadores del riesgo de la contaminación. Todo ello en un contexto capaz de tener en cuenta la gran incertidumbre inherente al proceso de modelación originada tanto por la propia medición como por la escasez de las mismas.

Para ello las tareas se dividieron en dos grandes apartados. Por un lado, se desarrolló una metodología para “extender” la escasa base de datos y por otro, se llevó a cabo un análisis geoestadístico a partir del cual se derivaron los estimadores y los indicadores de riesgo de la contaminación. El área elegida para el estudio fue la Plana Sur de Valencia.

En la primera parte la base de datos originalmente compuesta por las mediciones correspondientes a 6 pozos fue modelizada utilizando PRZM5 para obtener las curvas de concentración del cada pesticida en el primer metro del acuífero subyacente. Pero esto se hizo mediante una aproximación probabilística que consistió en la simulación de diferentes escenarios, todos ellos plausibles. Los distintos escenarios se generaron a partir de considerar distintos valores para los 4 parámetros a los que el modelo mostró ser más sensible: la tasa aplicada de pesticida, el año hasta el cual el pesticida fue aplicado, el contenido de materia orgánica del suelo y el coeficiente de partición del pesticida. Esto supuso simular 324 escenarios, o lo que es lo mismo, 54 escenarios para cada uno de los 6 pozos. Posteriormente, se fijaron las localizaciones de 23 pozos ficticios seleccionados en base al mapa de usos del suelo de la zona modelada. Todos los pozos, reales y ficticios, corresponden a suelo donde se cultivan cítricos. Se ajustan algunos de los parámetros que dependen de cada localización como es el caso del nivel freático y se procede a plantear escenarios del tipo de los usados anteriormente para la

simulación de las curvas de llegada en estos nuevos pozos. El resultado es la simulación de 552 escenarios (24 por cada pozo). Para el análisis posterior se requiere seleccionar una curva representativa de cada localización y un tiempo para el cual estudiar cada pesticida. Se selecciona la curva media y el mes de julio de 2016. Por tanto, disponemos ahora de 29 medidas regularmente distribuidas por el área de estudio correspondientes al mes de julio de 2016.

En la segunda parte del análisis se procede a derivar estimadores e indicadores de riesgo de la contaminación en la zona de estudio. Para ello, se realiza un análisis geoestadístico de la incertidumbre local de la concentración de los pesticidas. Dicho análisis consiste en aplicar la técnica del krigeado indicador que da como resultado la función de distribución de probabilidades de la variable en cuestión en cada una de las localizaciones deseada. A partir de estas funciones es posible derivar una gran cantidad de información. Por un lado, distintos estimadores y por otro, indicadores del riesgo de la contaminación. En este trabajo, los estimadores derivados han sido: el valor esperado, el valor mediano y diferentes cuantiles de la concentración de los pesticidas para cada localización. Posteriormente, se procede a generar diferentes mapas del riesgo de la contaminación. Si se dispone de algún estimador de la concentración el enfoque más intuitivo consiste en declarar contaminados todos los lugares en los que la concentración estimada supere el máximo tolerable. También es posible valorar el riesgo de declarar contaminado un lugar seguro (falso positivo), y a la inversa, se podría declarar seguro un lugar contaminado (falso negativo). Otro planteamiento consiste en declarar contaminados todos los lugares en los que la probabilidad de superar el máximo tolerable sea superior a una probabilidad determinada. Puede utilizarse la probabilidad experimental de superar el umbral crítico. Un tercer enfoque consiste en evaluar el impacto económico de las dos posibles decisiones a tomar utilizando el concepto de función de pérdida. Cada lugar se clasifica como seguro o contaminado con el fin de minimizar la pérdida esperada resultante. A diferencia de los enfoques anteriores, basados en las probabilidades de superar umbrales críticos o en los riesgos de clasificación errónea, aquí la decisión se basa en costes económicos. El paso clave es la especificación de las funciones económicas que miden el impacto de los dos tipos de clasificación errónea. Los detalles y resultados de la aproximación planteada pueden verse en las distintas presentaciones que se han realizado en congresos durante este año y que se adjuntan a la documentación presente.

En resumen, se ha estudiado la contaminación por pesticidas en el área de la Plana Sur de Valencia. Mediante modelación numérica se ha evaluado la concentración del pesticida de forma continua en el tiempo correspondiente al primer metro del acuífero subyacente. Utilizando krigeado indicador se han construido las funciones locales de distribución de probabilidad de la concentración del pesticida. A partir de ellas, se derivan 3 estimadores óptimos y se presentan 3 criterios que tienen en cuenta la incertidumbre asociada a la estimación de las concentraciones para delinear zonas contaminadas y elaborar mapas del riesgo de la contaminación.



Se ha visto que, si bien tanto las herramientas de modelación numérica como las geoestadísticas son potentes, su desempeño está condicionado a los datos disponibles. El análisis mostrado corresponde a un tiempo determinado pero su automatización para hacer un cálculo en diferentes momentos no es complicada. Los mapas obtenidos podrían ser traducidos a mapas cuantitativos al estilo de los obtenidos con los códigos de análisis de la vulnerabilidad de acuíferos.

Los resultados del trabajo de este último año han sido presentados en el 12th International Geostatistics Congress (GEOSTATS 2024), en el Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas (CIAS 2024), y en las Jornadas sobre Contaminación de las Aguas Subterráneas (CONTAS 2024). Además, será presentado durante 2025 en la Asamblea General de la EGU en Viena. Por último, en este momento estamos redactando un artículo a publicar en una revista científica con los resultados correspondientes a este tercer año de proyecto.

Como miembro del equipo de investigación del proyecto, y como representante del mismo a los efectos de informar dentro del Instituto Geológico y Minero de los resultados obtenidos, firmo a continuación este informe:

Fdo. Carolina Guardiola Albert

Así mismo, como Investigador Principal del proyecto, firma a continuación Eduardo Cassiraga, Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Valencia:

Fdo. Eduardo Cassiraga