

Índice

Índice de figuras

Índice de tablas

1. Introducción y objetivos.....	1
2. Estado del arte.....	6
2.1. Los pesticidas.....	6
2.2. Tipos de pesticidas.....	9
2.3. Procesos de transformación.....	11
2.3.1. Los procesos de acumulación de los pesticidas.....	12
2.3.2. Los procesos de degradación de los pesticidas.....	12
2.3.3. Los procesos de movimiento de los pesticidas.....	14
2.4. Pesticidas en las aguas subterráneas.....	16
2.4.1. Impactos en los recursos de aguas subterráneas.....	16
2.4.2. Presencia y concentraciones de pesticidas en las aguas subterráneas de España.....	18
2.5. Modelos matemáticos para evaluar la contaminación por pesticidas.....	20
2.6. El modelo PRZM5.....	25
2.6.1. Dispersión y difusión.....	30

2.6.2. Degradación	30
2.6.3. Consumo de la planta de la fase disuelta	31
2.6.4. Pérdidas debidas a la escorrentía superficial	31
2.6.5. Pérdidas debidas a la erosión.....	31
2.6.6. Aplicación del pesticida	32
2.6.7. Lavado desde las plantas al suelo.....	32
2.6.8. Transformaciones	33
3. Modelación de la contaminación por pesticidas en la Demarcación Hidrográfica del Júcar	35
3.1. Introducción	35
3.2. Materiales y métodos.....	38
3.2.1. Descripción de la zona de estudio	38
3.2.2. Identificación y características de los pesticidas en la zona de estudio	42
3.2.3. Implementación del modelo	44
3.2.3.1. Propiedades químicas de los pesticidas	44
3.2.3.2. Aplicaciones del pesticida	45
3.2.3.3. Distribución de los cultivos	46
3.2.3.4. Generación de archivos meteorológicos para PWC	49
3.2.4. Indicadores de evaluación	52
3.3. Resultados y discusión	53
3.3.1. Concentraciones de Bromacil.....	53
3.3.2. Concentraciones de Atrazina.....	55
3.3.3. Concentraciones de Terbutilazina	57
3.3.4. Concentraciones de Desetil-Terbutilazina.....	59
3.3.5. Concentraciones de Terbumeton	60
3.3.6. Criterios de evaluación.....	62
3.3.7. Evaluación del impacto ambiental.....	63
4. Elaboración de los mapas de riesgo de la contaminación por pesticidas en la DHJ	67
4.1. Introducción	67
4.2. Zona de estudio	70

4.3. Metodología.....	71
4.3.1. Modelo.....	71
4.3.2. Pesticidas: base de datos y selección de principios activos.....	71
4.3.3. Datos relativos a la aplicación del pesticida.....	71
4.3.4. Base de datos climáticos.....	71
4.3.5. Unidades cartográficas suelo-clima.....	72
4.3.6. Fenología de los cultivos.....	73
4.3.7. Automatización de las simulaciones con SENSAN.....	75
4.3.8. Diseño de mapas de riesgo de la contaminación por pesticidas.....	75
4.3.9. Krigado ordinario (KO).....	76
4.3.10. Simulación gaussiana secuencial.....	77
4.3.11. S-GeMS.....	79
4.4. Resultados.....	79
4.4.1. Obtención de las curvas de concentración de los pesticidas.....	79
4.4.1.1. Concentraciones de Atrazina.....	80
4.4.1.2. Concentraciones de Bromacil.....	81
4.4.1.3. Concentraciones de Terbutilazina.....	84
4.4.1.4. Concentraciones de Terbumeton.....	86
4.4.2. Análisis de algunos valores obtenidos.....	88
4.5. Tratamiento espacial de la concentración de los pesticidas.....	90
4.5.1. Mapas de la concentración estimada de la Atrazina.....	94
4.5.2. Mapas de la concentración estimada del Bromacil.....	96
4.5.3. Mapas de la concentración estimada de la Terbutilazina.....	98
4.5.4. Mapas de la concentración estimada del Terbumeton.....	100
4.6. Mapas con medidas de incertidumbre de pesticidas.....	103
4.7. Generación de mapas de riesgo de zonas contaminadas por pesticidas.....	105
5. Conclusiones.....	111
6. Líneas futuras de investigación.....	114
7. Contribuciones científicas.....	115
8. Referencias.....	118
9. Anexos.....	138

Índice de figuras

Figura 1. Cantidad consumida de pesticidas en el mundo desde el año 1990 hasta el año 2019	8
Figura 2. Principales países consumidores de pesticidas en todo el mundo.....	8
Figura 3. Uso de pesticidas en toneladas por continente en 2020 y variación porcentual desde 1999.	9
Figura 4. Procesos que condicionan la dinámica de los pesticidas en el medio ambiente	11
Figura 5. Modelo conceptual de PRZM5	26
Figura 6. Esquema del balance de masa de un pesticida en el modelo PRZM	28
Figura 7. Localización de la zona de estudio y de las masas de agua subterránea de DHJ.....	38
Figura 8. Evolución de la precipitación y temperatura en la DHJ.....	39
Figura 9. Ubicación de los pozos simulados	40
Figura 10. Distribución de los cultivos en la DHJ.....	47
Figura 11. Estructura del archivo meteorológico para ejecutar PWC	50
Figura 12. Resultados de la simulación de PRZM5. Concentraciones de Bromacil	54
Figura 13. Resultados de la simulación de PRZM5. Concentraciones de Atrazina	56
Figura 14. Resultados de la simulación de PRZM5. Concentraciones de Terbutilazina.....	58
Figura 15. Resultados de la simulación de PRZM5. Concentraciones de Terbutilazina.....	59
Figura 16. Resultados de la simulación de PRZM5. Concentraciones de Terbumeton	61
Figura 17. Diagrama de caja que representan las concentraciones anuales de pesticidas en 2012: Bromacil (azul), Atrazina (verde), Terbutilazina (naranja), Desetil-Terbutilazina (morado) y Terbumeton (rojo). La línea horizontal central representa la mediana y las barras verticales representan los valores máximo y mínimo de la distribución. Los valores atípicos no están representados.	65

Figura 18. Diagrama de caja que representan las concentraciones anuales de pesticidas en 2013: Bromacil (azul), Atrazina (verde), Terbutilazina (naranja), Desetil-Terbutilazina (morado) y Terbumeton (rojo). La línea horizontal central representa la mediana y las barras verticales representan los valores máximo y mínimo de la distribución. Los valores atípicos no están representados.	66
Figura 19. Localización geográfica de los pozos contaminados por pesticidas de la DHJ.	70
Figura 20. Mapa litológico de la DHJ.	72
Figura 21. Distribución de los cultivos en la DHJ.	74
Figura 22. Simulación calibrada con Atrazina en los pozos de la DHJ entre 2006-2019.	80
Figura 23. Simulación calibrada con Bromacil en los pozos de la DHJ entre 2006-2019.	82
Figura 24. Simulación calibrada con Terbutilazina en los pozos de la DHJ entre 2006-2019.	84
Figura 25. Simulación calibrada con Terbumeton en los pozos de la DHJ entre 2006-2019.	86
Figura 26. Valores máximos simulados de Atrazina y Bromacil.	88
Figura 27. Valores máximos simulados de Terbumeton y Terbutilazina.	89
Figura 28. Distribución de la concentración máxima absoluta a) Atrazina, b) Bromacil, c) Terbumeton y d) Terbutilazina en cada pozo de la DHJ.	91
Figura 29. Mapas de la concentración de Atrazina (2006-2014) estimados por krigeado ordinario.	94
Figura 30. Mapas de la concentración de Atrazina (2015-2018), media y máxima estimados por krigeado ordinario.	95
Figura 31. Mapas de la concentración de Bromacil (2006-2014) estimados por krigeado ordinario.	97
Figura 32. Mapas de la concentración de Bromacil (2015-2018), media y máxima estimados por krigeado ordinario.	98
Figura 33. Mapas de la concentración de Terbutilazina (2015-2018), media y máxima estimados por krigeado ordinario.	99
Figura 34. Mapas de la concentración de Terbutilazina (2006-2014) estimados por krigeado ordinario.	100
Figura 35. Mapas de la concentración de Terbumeton (2015-2018), media y máxima estimados por krigeado ordinario.	101

Figura 36. Mapas de la concentración de Terbumeton (2006-2014) estimados por krigeado ordinario	102
Figura 37. Mapas de medidas de incertidumbre local para la Atrazina.....	103
Figura 38. Mapas de medidas de incertidumbre local para el Bromacil.....	103
Figura 39. Mapas de medidas de incertidumbre local para la Terbutilazina.	104
Figura 40. Mapas de medidas de incertidumbre local para el Terbumeton.....	104
Figura 41. Mapas de riesgo y clasificación de Atrazina.....	106
Figura 42. Mapas de riesgo y clasificación de Bromacil.....	107
Figura 43. Mapas de riesgo y clasificación de Terbutilazina	108
Figura 44. Mapas de riesgo y clasificación de Terbumeton	109

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de pesticidas utilizados en la producción agrícola (FAO, 2022)	10
Tabla 2. Principales características de los modelos matemáticos para el análisis de pesticidas	24
Tabla 3. Identificación de los pesticidas en las masas de agua subterránea de la DHJ.....	41
Tabla 4. Rangos de valores utilizados en la modelización, para describir las propiedades fisicoquímicas de los plaguicidas. Parámetros en la pestaña "Chemical" del PWC.....	44
Tabla 5. Rango de valores utilizados en la modelización para describir la cantidad de pesticida en la masa de agua de Plana de Castellón. Parámetros en la pestaña "Applications" del PWC.	45
Tabla 6. Rango de valores utilizados en la modelización para describir los parámetros relacionados con el cultivo y la hidrología de cada cultivo. Parámetros en la pestaña "Crop/land" del PWC	48
Tabla 7. Capas de suelo. Valores de los diferentes parámetros que describen el perfil del suelo de cada agua subterránea. Parámetros en la pestaña "Crop/land" del PWC.....	49
Tabla 8. Ubicación de los pozos simulados	51
Tabla 9. Estaciones hidrometeorológicas.....	51
Tabla 10. Resumen de los resultados de la evaluación del modelo.....	63
Tabla 11 Resumen de parámetros del modelo anisotrópico para la Atrazina	92
Tabla 12 Resumen de parámetros del modelo anisotrópico para la Bromacil	92
Tabla 13 Resumen de parámetros del modelo anisotrópico para la Terbumeton	93
Tabla 14 Resumen de parámetros del modelo anisotrópico para la Terbutilazina	93