

Cuadernos de I+D+i

18

Canal 
de Isabel II **gestión**

Aportación de nutrientes desde
la cuenca al embalse de Pinilla.
Incidencia en el proceso
de eutrofización.

18

Aportación de nutrientes desde la cuenca al embalse de Pinilla. Incidencia en el proceso de eutrofización.



Esta versión forma parte de la Biblioteca Virtual de la **Comunidad de Madrid** y las condiciones de su distribución y difusión se encuentran amparadas por el marco legal de la misma.



www.madrid.org/publicamadrid

© Canal de Isabel II Gestión S.A. (2013)

Autores

Dinámica Fluvial e Ingeniería Hidrológica (Flumen),
Departamento de Ecología, Universidad Barcelona

Rafael Marcé Romero

Gonzalo González González

Jaime Ordóñez Salinas

María de los Ángeles Gallegos Cañadas

Joan Armengol Bachero

Canal de Isabel II Gestión, S.A.

J. Iñaki Urrutia Gutiérrez

Dirección del estudio

Juan Carlos Ibáñez Carranza

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento por su colaboración y especial aportación a Alma M^a Jiménez Rodríguez, Adela Llamazares Prados y María del Carmen Gordo Muñoz de la Subdirección de Calidad de las Aguas, a Jaime Flores Cabeza y Francisco Luis Cubillo González de la Subdirección de I+D+i de Canal de Isabel II; y a la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, por haber facilitado la cartografía y los permisos de muestreo.

ISSN de la edición impresa: 2254-8955

ISSN de la edición en soporte electrónico: 2340-1818

Depósito legal: M-27079-2013

Exclusión de Responsabilidad

Las afirmaciones recogidas en el presente documento reflejan la opinión de los autores y no necesariamente la de Canal de Isabel II Gestión S.A.

Tanto Canal de Isabel II Gestión S.A. como los autores de este documento declinan todo tipo de responsabilidad sobrevenida por cualquier perjuicio que pueda derivarse a cualesquiera instituciones o personas que actúen confiadas en el contenido de este documento, o en las opiniones vertidas por sus autores.

Presentación

Los cuadernos de I+D+i de Canal de Isabel II Gestión S.A. forman parte de la estrategia de gestión del conocimiento de la empresa y del desarrollo de su Plan de Investigación, Desarrollo e Innovación.

Son elemento de difusión de proyectos e iniciativas desarrollados y auspiciados desde la Empresa para la innovación en las áreas relacionadas con el servicio de agua en el entorno urbano.

Exponen las diferentes problemáticas abordadas en cada proyecto junto con los resultados obtenidos. La intención al difundirlos mediante estas publicaciones es compartir las experiencias y conocimientos adquiridos con todo el sector de servicios de agua, con la comunidad científica y con cuantos desarrollan labores de investigación e innovación. La publicación de estos cuadernos pretende contribuir a la mejora y eficiencia de la gestión del agua y, en consecuencia, a la calidad del servicio prestado a los ciudadanos.

Los títulos aparecidos en la colección de Cuadernos de I+D+i son los siguientes:

TÍTULOS EN LA COLECCIÓN DE CUADERNOS DE I+D+I

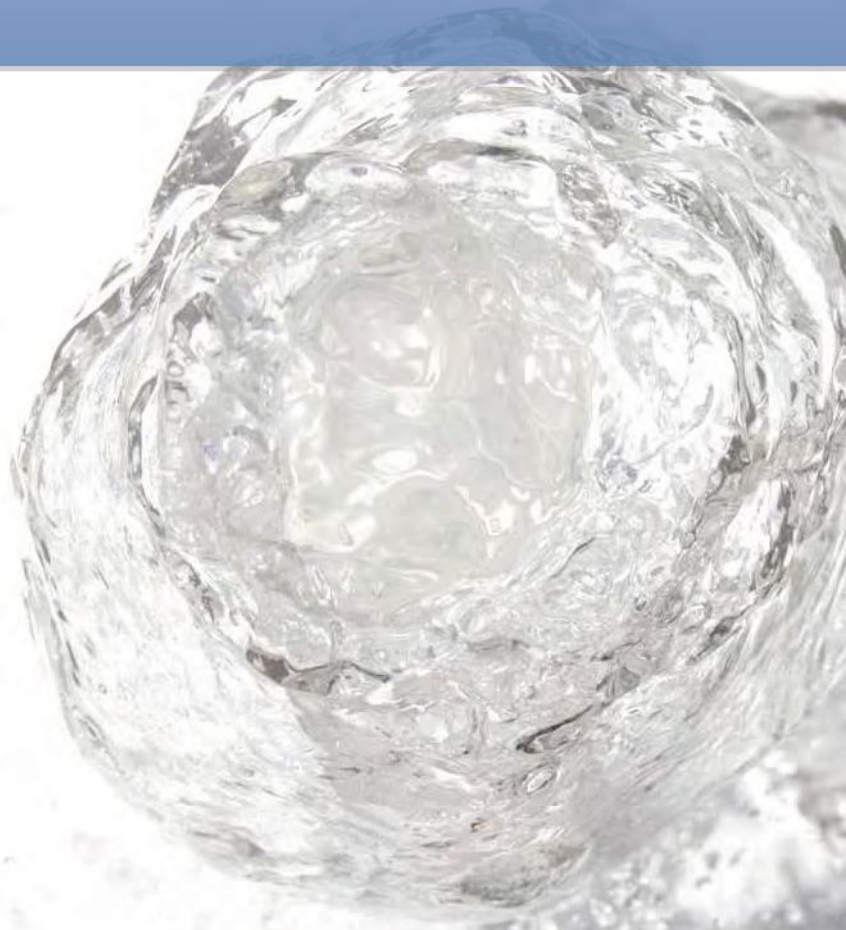
<i>Nº colección</i>	<i>Año</i>	<i>ISSN</i>	<i>Cuadernos Investigación, Desarrollo e Innovación publicados</i>
1	2007	2254-8955	Transferencias de derechos de agua entre demandas urbanas y agrarias. El caso de la Comunidad de Madrid
2	2008	2254-8955	Identificación de rachas y tendencias hidrometeorológicas en el ámbito del sistema de Canal de Isabel II
3	2009	2254-8955	Participación de Canal de Isabel II en el Proyecto Internacional de Eficiencia en la Gestión (IDMF)
4	2008	2254-8955	Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid
5	2008	2254-8955	El agua virtual y la huella hidrológica en la Comunidad de Madrid
6	2008	2254-8955	Estudio de potenciales de ahorro de agua en usos residenciales de interior
7	2008	2254-8955	Investigación sobre potenciales de eficiencia con el empleo de lavavajillas
8	2010	2254-8955	Precisión de la medida de los consumos individuales de agua en la Comunidad de Madrid
9	2010	2254-8955	Proyecto de investigación para la definición y evaluación de la aplicabilidad de un bioensayo para la determinación de la toxicidad del agua utilizando embriones de pez Cebra
10	2010	2254-8955	Eficiencia en el uso del agua en jardinería en la Comunidad de Madrid
11	2010	2254-8955	Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid
12	2010	2254-8955	Estudio sobre la dinámica de cianotoxinas en dos embalses de abastecimiento de Canal de Isabel II
13	2011	2254-8955	Desarrollo de un sistema de validación, estimación y predicción de consumos horarios por sectores para la red de distribución de Canal de Isabel II
14	2011	2254-8955	Seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid mediante técnicas de teledetección
15	2012	2254-8955	Experiencias para la recuperación del fósforo de las aguas residuales en forma de estruvita en Canal de Isabel II
16	2012	2254-8955	Integración de la predicción meteorológica en los módulos de gestión del sistema de abastecimiento de Canal de Isabel II, mediante modelos de aportación diaria
17	2012	2254-8955	Mejora de la capacidad de pronóstico de aportaciones mensuales y estacionales en el ámbito de Canal de Isabel II

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. RESUMEN EJECUTIVO	10
2. INTRODUCCIÓN	23
2.1. ANTECEDENTES	24
2.2. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO	24
2.3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	25
3. ESTABLECIMIENTO DEL BALANCE DE NUTRIENTES Y MATERIA ORGÁNICA EN LA CUENCA DEL EMBALSE DE PINILLA	27
3.1. DISEÑO Y PUESTA A PUNTO DE UNA RED DE MUESTREO EN EL CAMPO	29
3.2. RECOGIDA DE MUESTRAS	30
3.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO	30
3.4. ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DEL RÍO Y EXTRAPOLACIÓN A PUNTOS AFORADOS OCASIONALMENTE, O NO AFORADOS	31
3.5. CÁLCULO DE BALANCES POR SUBCUENCAS	34
3.5.1. Metodología	34
3.5.2. Comparación de los resultados entre <i>LOADEST</i> y <i>ANFIS</i>	36
3.5.3. Distribución de cargas por puntos y períodos; balance y distribución de entradas en el embalse	39
3.6. ANÁLISIS ESPECTROSCÓPICO DE LA MATERIA ORGÁNICA DISUELTA	84
3.6.1. Modelo <i>PARAFAC</i> para la cuenca de Pinilla	85
3.6.2. Determinación de la biodegradabilidad de los componentes de la materia orgánica identificados modelo <i>PARAFAC</i>	87
3.6.3. Variabilidad y distribución de los componentes de materia orgánica disuelta	88
3.6.4. Resumen de los principales hallazgos	91
4. MODELACIÓN DE LAS CARGAS DE NUTRIENTES Y MATERIA ORGÁNICA AL EMBALSE	95
4.1. MODELO <i>SPARROW</i>	97
4.2. IMPLEMENTACIÓN DE <i>SPARROW</i> EN LA CUENCA DE PINILLA	99
4.2.1. Recopilación de datos necesarios para la modelación	99
4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO <i>SPARROW</i>	102
4.4. EVALUACIÓN DE LOS APORTES DIFUSOS Y PUNTUALES	111
4.4.1. Modelo para el amonio	112
4.4.2. Modelo para carbono particulado	121
4.4.3. Modelo para carbono orgánico disuelto (DOC)	130
4.4.4. Modelo para la demanda química de oxígeno (DQO)	139
4.4.5. Modelo para el hierro disuelto	148
4.4.6. Modelo para el manganeso	157
4.4.7. Modelo para el nitrato	166
4.4.8. Modelo para el nitrógeno total	175
4.4.9. Modelo para el fósforo total	184
4.4.10. Modelo para el silicato	193
4.4.11. Resumen de los resultados de los modelos	202
4.5. EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARGAS APORTADAS DESDE LA EDAR	202

5.	RESPUESTA DEL EMBALSE A LAS CARGAS DE NUTRIENTES Y MATERIA ORGÁNICA	207
5.1.	APLICACIÓN A PINILLA DE MODELOS EMPÍRICOS DE CARGA-RESPUESTA PARA LA PREDICCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA EN EL EMBALSE	209
5.1.1.	Consideraciones previas	209
5.1.2.	Aplicación y resultados de los modelos de carga-respuesta clásicos	210
5.1.3.	Aplicación y resultados de los modelos elaborados <i>ad hoc</i>	213
5.2.	ANÁLISIS DEL PAPEL DE LA MATERIA ORGÁNICA, PROVENIENTE DE LA CUENCA EN LA GENERACIÓN DE CAPAS ANÓXICAS, EN EL FONDO DEL EMBALSE PINILLA	219
5.2.1.	Generación de capas anóxicas - Factor de Anoxia	219
5.2.2.	Consumo de oxígeno en Pinilla - Balance de masas	221
6.	GENERACIÓN DE ESCENARIOS	229
6.1.	GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CARGAS DE NUTRIENTES Y MATERIA ORGÁNICA DESDE LA CUENCA Y SU IMPACTO EN EL PROCESO DE EUTROFIZACIÓN DEL EMBALSE DE PINILLA	232
6.1.1.	Escenarios para la reducción de la concentración de clorofila en el embalse	232
6.1.2.	Escenarios para la maximización de la concentración de oxígeno en el hipolimnion del embalse	236
6.2.	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE DE PINILLA	243
6.2.1.	Predicciones sobre cambio climático para la cuenca del Tajo	243
6.2.2.	Predicciones de cambio climático para cuenca del Lozoya: efectos locales y dimensión de gestión	245
6.2.3.	Afectaciones a la calidad del agua	247
7.	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO Y ACTUACIONES RECOMENDADAS PARA CONTROLAR EL PROCESO DE EUTROFIA EN EL EMBALSE DE PINILLA	251
7.1.	CONCLUSIONES	253
7.2.	RECOMENDACIONES	254
8.	ANEXOS	255
8.1.	ÍNDICE DE FIGURAS	257
8.2.	ÍNDICE DE TABLAS	265
8.3.	BIBLIOGRAFÍA	267

1. Resumen ejecutivo



Ficha Técnica

Título del proyecto	Aportación de nutrientes desde la cuenca al embalse de Pinilla. Incidencia en el proceso de eutrofización: evaluación, modelización y medidas paliativas
Línea de investigación	Impactos a escala de cuenca en la calidad del agua en embalses
Unidades implicadas de Canal de Isabel II Gestión, S.A.	Subdirección de Calidad de las Aguas, Subdirección de I+D+i
Participación externa	FLUMEN, Dinámica Fluvial e Ingeniería Hidrológica, Dpto. de Ecología, Universidad Barcelona
Objeto y justificación del proyecto	Canal de Isabel II cuenta con una serie de instalaciones entre las que destacan los cinco embalses situados en la cuenca del río Lozoya. En general, el agua para abastecimiento que aportan estos embalses es de buena calidad una vez el agua que se almacena ha recorrido los embalses de la cuenca. Sin embargo, existen importantes problemas de calidad del agua en el embalse de Pinilla, que sufre un proceso de eutrofización evidente. Destacan la generación de capas anóxicas, la liberación de metales desde el sedimento, olores desagradables y el empobrecimiento de la fauna piscícola. Es por ello que este estudio pretende caracterizar las entradas de nutrientes y materia orgánica al embalse desde la cuenca del embalse de Pinilla para proponer medidas de mitigación.
Contribución al estado del arte	El estudio de los aportes de materia orgánica y nutrientes al embalse de Pinilla ha aplicado las herramientas de última generación en la caracterización de las fuentes de nutrientes y materia orgánica a los cuerpos de agua, incluyendo métodos de lógica difusa, desarrollados por los autores, y modelos estadísticos con referencia espacial, lo que supone una de las primeras aplicaciones del modelo SPARROW en la Península. Se ha desarrollado un modelo espectroscópico de la tipología de la materia orgánica con la metodología más avanzada para caracterizar impactos ecológicos en embalses, la información obtenida se ha utilizado en la generación de escenarios para la mitigación del proceso de eutrofización de forma totalmente novedosa. Se han utilizado también los últimos avances en modelos de redes neuronales para entender los factores que rigen la dinámica de la concentración de clorofila en el embalse.
Resumen del desarrollo del proyecto e hitos relevantes	Se realizaron un total de 25 salidas al campo, durante las cuales se visitaron 16 puntos de muestreo, distribuidos estratégicamente a lo largo de la cuenca, para recoger muestras a las que se realizaron alrededor de 9200 determinaciones para diversos constituyentes y propiedades físicas. A partir de estos datos se realizaron balances de constituyentes por subcuencas, y se modeló estadísticamente con el modelo SPARROW el origen de los materiales para localizar las principales fuentes de materiales que inciden en el proceso de eutrofización del embalse. Esto se combinó con diversos modelos para la predicción de la concentración de clorofila y generación de capas anóxicas en el embalse, lo que permitió dilucidar los principales factores que rigen estas variables. Finalmente, se testaron diversos escenarios de gestión de las cargas de nutrientes y materia orgánica al embalse para mitigar el proceso de eutrofización, y se descartó que el cambio climático vaya a tener efectos negativos sobre la calidad del agua a corto y medio plazo.
Resumen de resultados obtenidos	Se han definido las áreas aguas abajo de Valdesquí, Rascafría, el arroyo Umbría, los tramos inmediatamente anteriores al embalse y el efluente de la depuradora de Pinilla como los puntos más importantes de aportación de materiales que inciden negativamente en la calidad del agua del embalse. Los resultados indican que el control de la concentración de amonio en el efluente de la depuradora y del ciclo del agua en los núcleos urbanos de la cuenca serían las medidas más eficaces para el control del proceso de eutrofización del embalse. También se recomienda la implantación de un punto de monitorización en el río Lozoya, a la entrada del embalse, para un control más efectivo de la evolución del embalse.
Líneas de investigación abiertas para la continuación de los trabajos	Los modelos estadísticos distribuidos espacialmente son herramientas muy eficientes para el estudio del origen de materiales que pueden incidir en la calidad del agua de los embalses, así este estudio puede servir de modelo para la aplicación de estas metodologías en otras localizaciones. El estudio de la materia orgánica por fluorescencia abre la posibilidad de controlar materia orgánica particularmente perjudicial para el nivel de oxidación de los cuerpos de agua mediante el desarrollo de sensores específicos de fluorescencia en el campo, lo que se será un campo fructífero en el futuro. Finalmente, el estudio abre la posibilidad de la aplicación de tecnologías innovadoras para la disminución del amonio en el efluente de depuradoras, y el estudio detallado del ciclo del agua urbano en la cuenca para una correcta gestión de las aguas residuales. Desde el grupo de investigación FLUMEN se estima que las actuaciones a escala de cuenca y depuradora en Pinilla podrían ser un tema particularmente ajustado a la convocatoria LIFE de la Comisión Europea.

Resumen Ejecutivo

Canal de Isabel II Gestión abastece a casi 6 millones de habitantes de la Comunidad de Madrid. Para proporcionar el volumen de agua necesario para ello se cuenta con las aportaciones de siete ríos de la sierra del Guadarrama: Alberche, Guadarrama-Aulencia, Guadalix, Manzanares, Lozoya, Jarama y Sorbe, utilizándose también los principales acuíferos de la región: el detrítico terciario y las calizas de Torrelaguna. Cuenta con una serie de instalaciones, entre las que destacan 14 embalses, con una capacidad total de almacenamiento de agua de 945,9 hectómetros cúbicos. Los cinco embalses situados en la cuenca del río Lozoya (Pinilla, Riosequillo, Puentes Viejas, El Villar y El Atazar) constituyen uno de los ejes principales en cuanto al almacenamiento del recurso gestionado.

Por acuerdo del Consejo de Gobierno de la Comunidad de Madrid, con fecha 1 de julio 2012, se constituyó Canal de Isabel II Gestión, S.A., teniendo como cometido la prestación de los servicios de abastecimiento, saneamiento y reutilización, incluyendo la atención a los usuarios y la actividad comercial, y manteniendo la designación Canal de Isabel II, para el ente público responsable de la gestión del ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid. (A lo largo de este documento se emplearán ambas denominaciones para designar a la empresa).

En general, el agua para abastecimiento que aportan estos embalses es de buena calidad, ya que una buena parte del recurso se capta en la presa de El Atazar, después de que gran parte del agua que allí se almacena haya recorrido los otros cuatro embalses de la cuenca. El embalse de Pinilla, sufre un proceso de eutrofización evidente. Se entiende por eutrofización la proliferación masiva de algas en las capas superficiales de un embalse debido al aporte excesivo de sales nutrientes desde la cuenca. Aparte de suponer un problema estético y operacional, ya que enriquece el agua en materia orgánica, esto tiene otras consecuencias negativas. Destacan la generación de capas anóxicas en el fondo, la liberación de metales desde el sedimento, olores desagradables y el empobrecimiento de la fauna piscícola. Los problemas de calidad detectados, mediante el seguimiento limnológico de los embalses de la cuenca del Lozoya, ponen de manifiesto la necesidad de incorporar la cuenca hidrográfica del sistema de embalses en el estudio de la calidad del agua que suministran. Los pasos en el estudio han sido los siguientes:

1. Canal de Isabel II encarga al grupo de investigación FLUMEN (Universidad de Barcelona) el estudio sobre la aportación de nutrientes desde la cuenca al embalse de Pinilla (Figura 1), su incidencia en el proceso de eutrofización, y definición de medidas paliativas.
2. La combinación de datos de campo y modelación a escala de cuenca destacan, como principales focos de nutrientes y materia orgánica en la cuenca las poblaciones de Rascafría, Lozoya y núcleos urbanos, la depuradora de Pinilla, el tramo anterior al embalse, la estación de Valdesquí y el arroyo Umbría. En la mayor parte de estos puntos se ha detectado la presencia de material orgánico muy lábil.
3. En los modelos, los usos de suelo urbano están asociados a importantes cargas de materiales, particularmente amonio, DQO y nitrógeno y fósforo total, (Figura 2).
4. Las entradas desde el río Lozoya dominan los aportes al embalse para la mayoría de materiales, aunque la depuradora es el principal aporte de amonio y hierro, (Figura 3).
5. El embalse actúa como exportador de fósforo y manganeso, lo que confirma procesos de redisolución desde el sedimento (Tabla 1).
6. El embalse de Pinilla puede calificarse como moderadamente eutrófico, según las concentraciones de clorofila que presenta (Figura 4 y 5), con un riesgo real de sufrir un empeoramiento repentino si las cargas de fósforo aumentaran de forma apreciable. Las poblaciones de algas parecen estar controladas, a escala estacional por las entradas de materiales desde el río, particularmente de nitrógeno total.

7. Aunque el desarrollo de capas anóxicas en el embalse es moderado, se dan fenómenos de redisolución de metales y nutrientes a partir de concentraciones de oxígeno medias hipolimnéticas de $2,5 \text{ mg L}^{-1}$, (Figura 6).
8. El balance de masa de consumo de oxígeno en el hipolimnion da un papel muy importante a la demanda sedimentaria, en especial en caudales bajos. La DQO procedente de la cuenca domina el balance de oxígeno en momentos de caudales altos. El efecto de la depuradora es menor al 10 por ciento del consumo total, en todos los casos (Tabla 2).

FIGURA 1. CÁLCULO DE BALANCES, RESUMEN SISTEMA LOZOYA

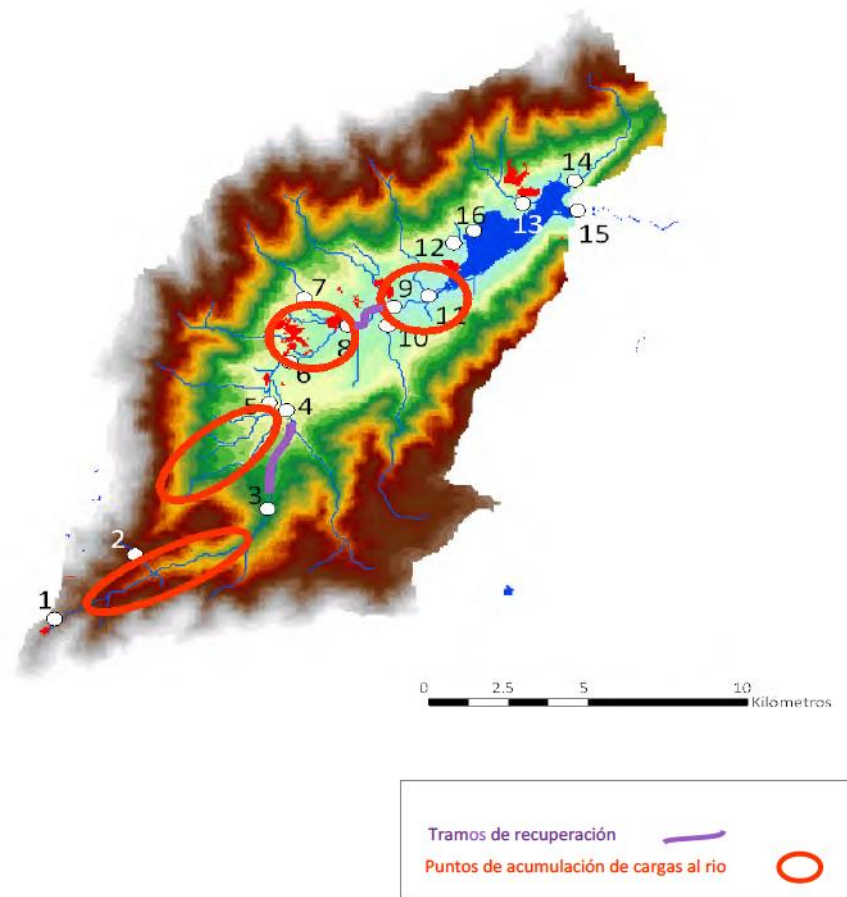


FIGURA 2. CARGAS DE MATERIALES Y PERIODOS

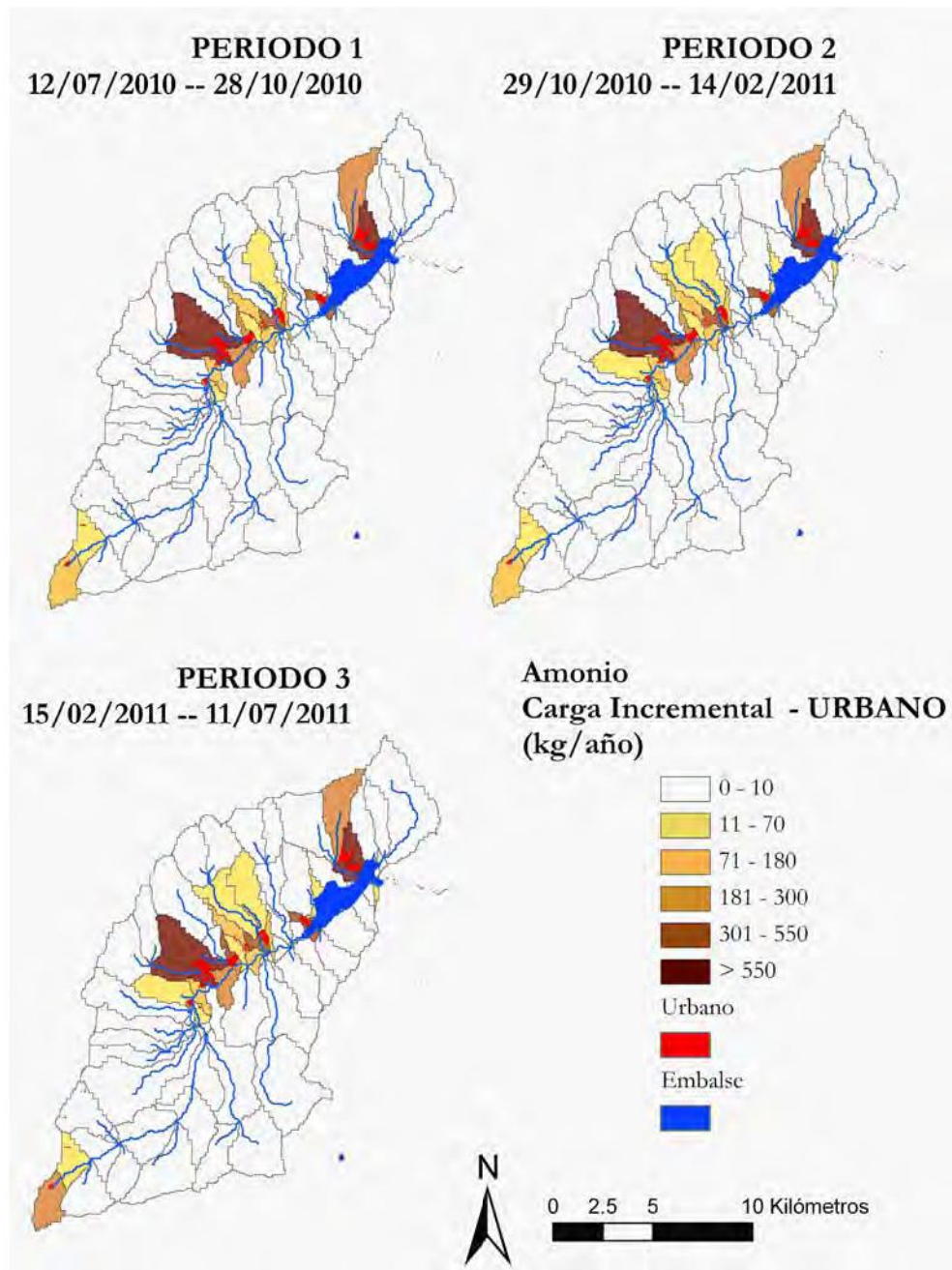


FIGURA 3. MODELACIÓN SPARROW, ORIGEN DE LAS CARGAS AL EMBALSE DE PINILLA

Origen de las cargas en el embalse de Pinilla, modelación SPARROW

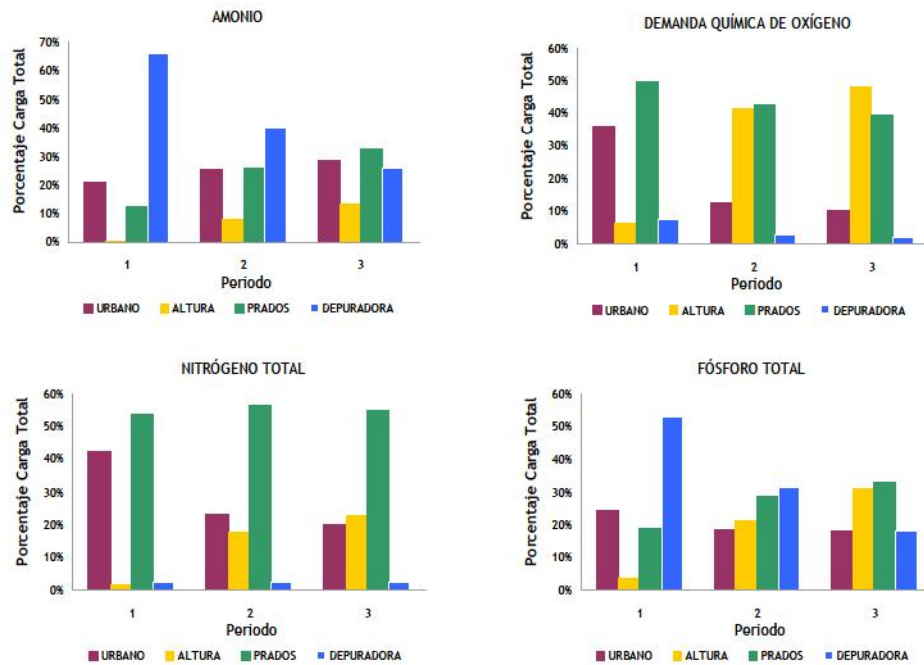


TABLA 1. PROCESOS DE REDISOLUCIÓN DESDE EL SEDIMENTO EN EL EMBALSE DE LA PINILLA

Elemento	Sumidero	Exportador
PT		X
NT	X	
NTP		X
CTP	X	
NPOC		X
NH ₄	X	
DQO	X	
NO ₃	X	
PO ₄		X
Fe	X	
Mn		X
Cl		X
Si	X	

FIGURA 4. MODELOS EMPÍRICOS DE CARGA-RESPUESTA PARA LA PREDICCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA

Escala anual

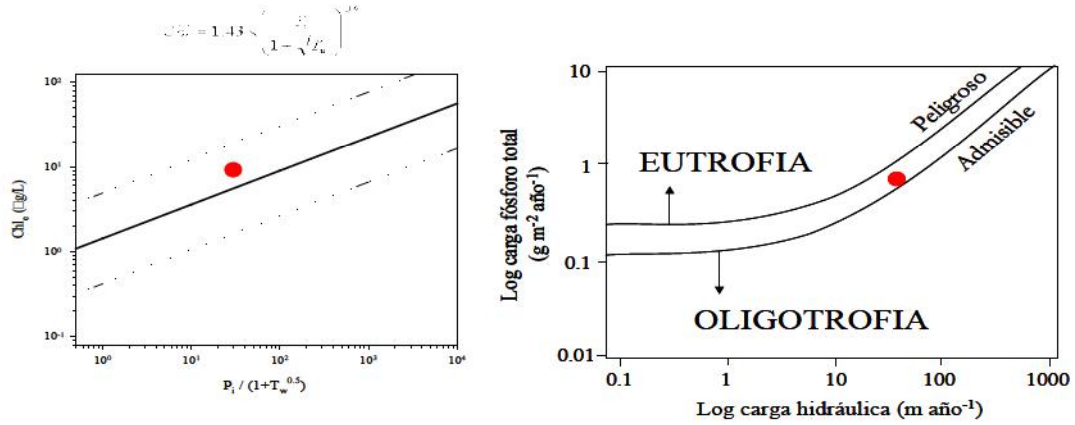


FIGURA 5. MODELOS DE RED NEURONAL PARA LA PREDICCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA

Escala quincenal

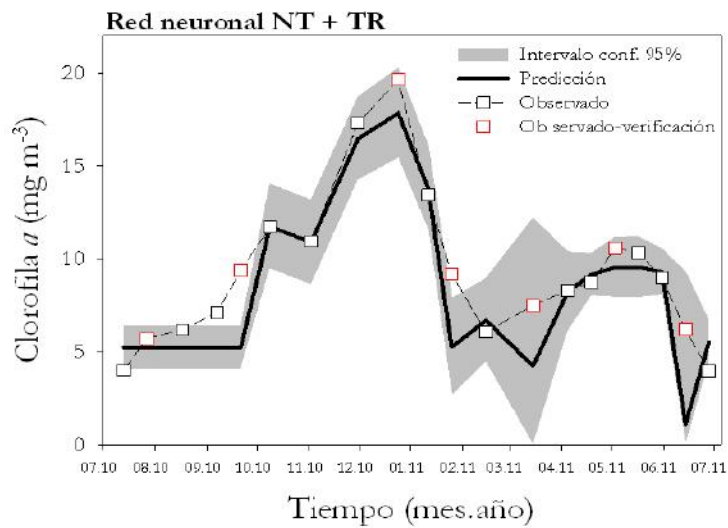


FIGURA 6. PAPEL DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LA GENERACIÓN DE CAPAS ANÓXICAS

Papel de la materia orgánica en la generación de capas anóxicas

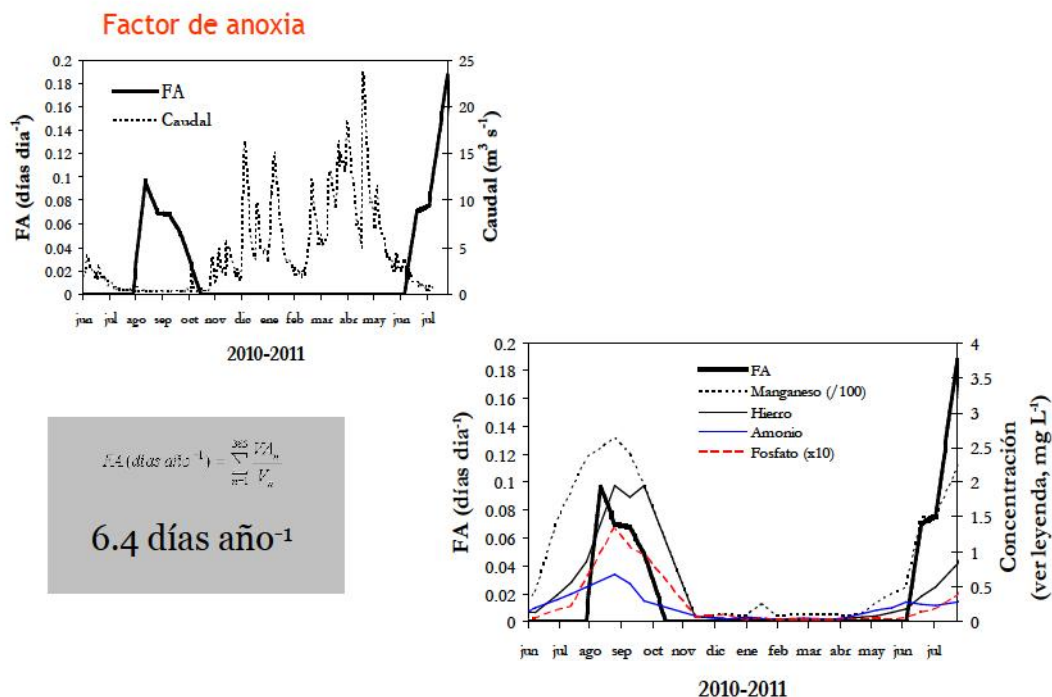


TABLA 2. PARÁMETROS MEDIDOS POR EL DEPARTAMENTO DE AGUAS NATURALES

Período	Consumo aparente de O ₂	DQO Efectiva Total	% de consumo aparente por tributarios	% de consumo aparente por depuradora	% de consumo aparente por sedimento	Demanda del sedimento (g O ₂ ·m ⁻² ·día ⁻¹)
Seco	47,5	12,8	20	7	73	0,69
Húmedo	189,7	103,2	52	2	46	0,59

9. El control de la carga de fósforo total sólo tiene un efecto evidente en la concentración de clorofila y el riesgo de eutrofización en el embalse si se aplican medidas a escala de cuenca (PT1). Actuaciones limitadas a la depuradora de Pinilla tendrían resultados pequeños (PT2 y PT3), (Figura 7).
10. El control de las cargas de amonio desde la depuradora puede tener un efecto apreciable en la evolución estacional de la clorofila en el embalse (NT4). Si las actuaciones incluyen también los usos urbanos en la cuenca, las mejoras serían más evidentes en situaciones de caudales altos durante el invierno (NT2), (Tabla 3, Figura 8).

FIGURA 7. CARGA DE FÓSFORO, CLOROFILA Y RIESGO DE EUTROFIZACIÓN

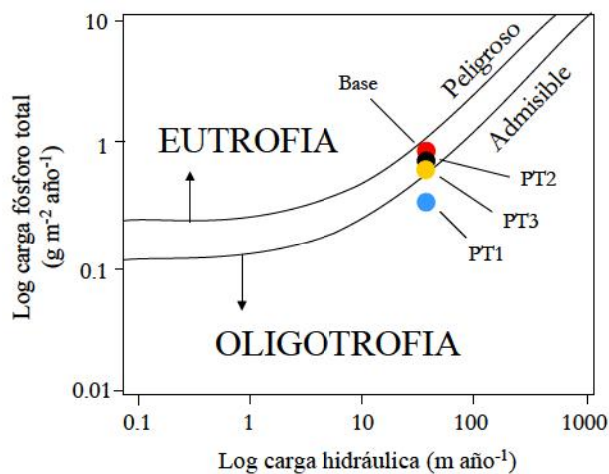
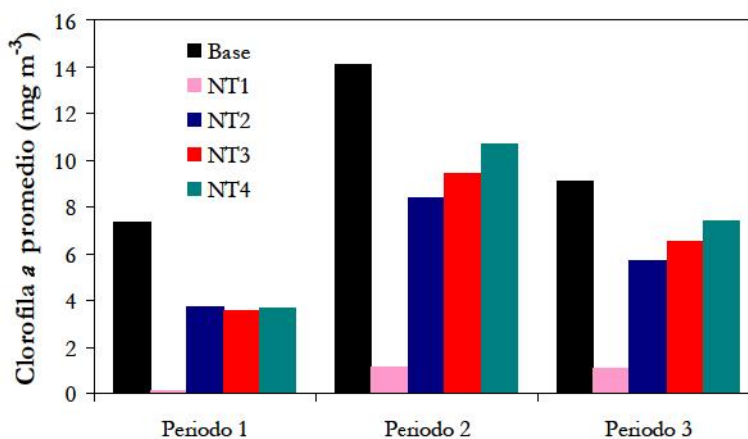


TABLA 3. CONTROL DE CARGAS DE AMONIO

Escenario	Definición	Reducción de carga en % respecto al total		
		Uso Urbano	Uso Prados	Depuradora
Escenario NT1	Idealizado	100	50	100
Escenario NT2	Actuación decidida	250	0	70
Escenario NT3	Realista	0	0	100
Escenario NT4	Realista (enfocado a NH ₄ ⁺)	0	0	100 del NH ₄ ⁺

FIGURA 8. MODELO ESTACIONAL



11. En periodos primavera-verano secos el control de las cargas de amonio desde la depuradora puede evitar la generación de capas anóxicas y limitar la carga interna (ver definición de escenarios en la Tabla 4, Figura 9).

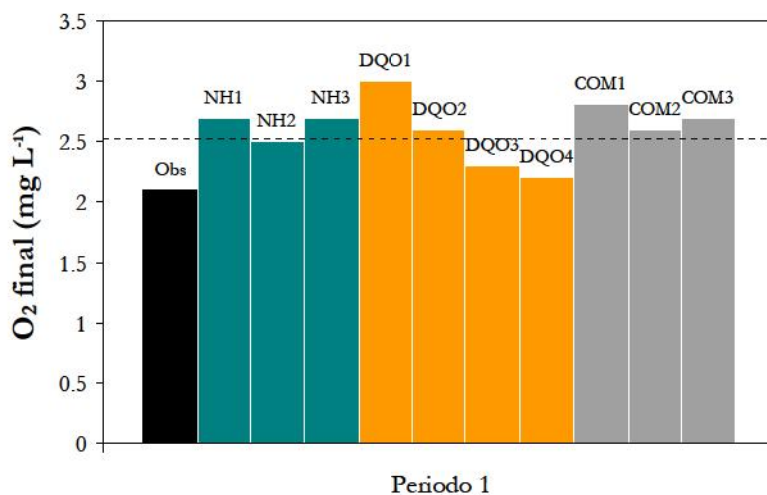
TABLA 4. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS PARA EL BALANCE DE OXÍGENO

Escenario	Definición	Reducción de carga en % respecto al total		
		Uso Urbano	Uso Prados	Depuradora
Escenario NH1	Idealizado	100	50	100
Escenario NH2	Actuación decidida	50	0	70
Escenario NH3	Realista	0	0	100

Escenario	Definición	Reducción de carga en % respecto al total	
		Tributarios	Depuradora
Escenario DQ01	Idealizado	100	100
Escenario DQ02	Actuación decidida	50	70
Escenario DQ03	Actuación decidida realista	20	0
Escenario DQ04	Realista	0	100

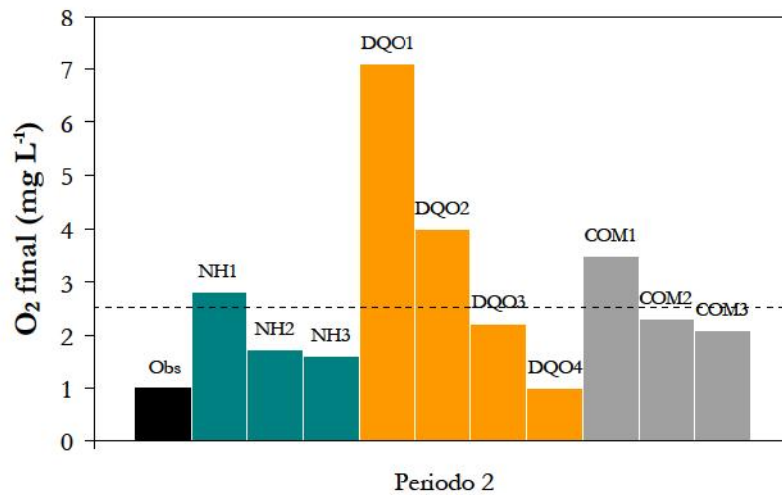
Escenario	Definición	Reducción de carga en % respecto al total		
		DQO Tributarios	NH ₄ ⁺ Depuradora	NH ₄ ⁺ Uso urbano
Escenario COM1	Actuación extrema	30	70	50
Escenario COM2	Actuación decidida	10	70	50
Escenario COM3	Actuación realista	10	90	0

FIGURA 9. BALANCE DE OXÍGENO - PERIODO 1



12. En periodos primavera-verano húmedos es necesario controlar la carga de DQO lábil desde la cuenca para evitar la generación de capas anóxicas. Esto resulta más eficiente si se combina con la limitación de las cargas de amonio desde los usos urbanos y la depuradora.

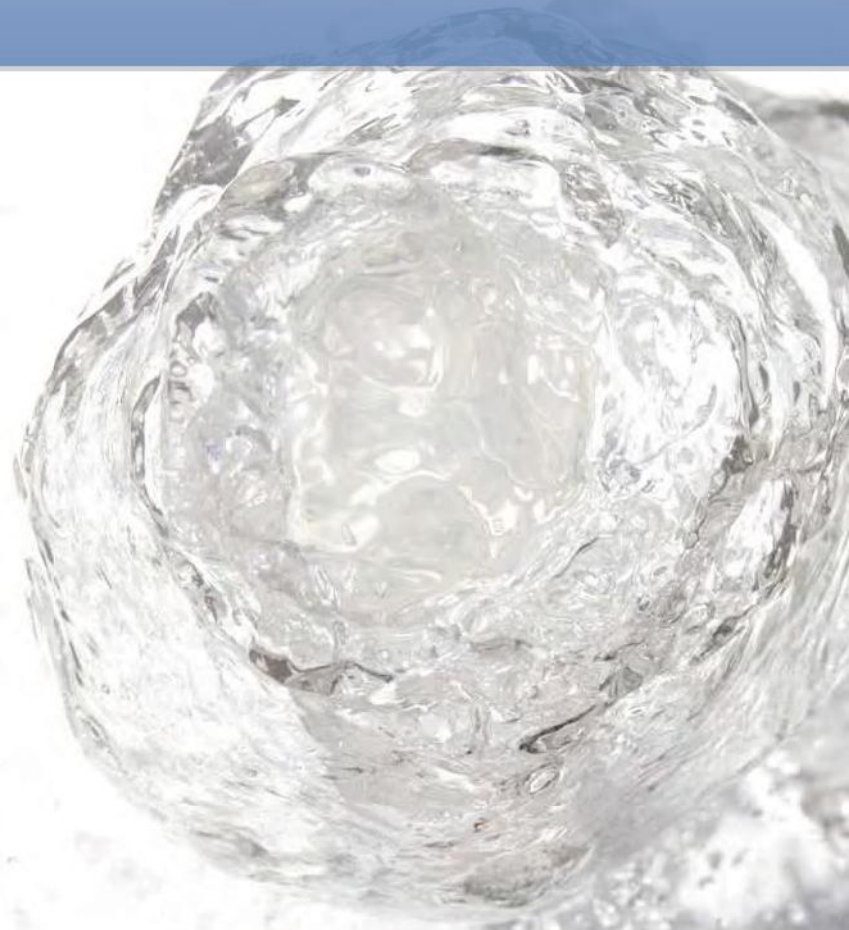
FIGURA 10. BALANCE DE OXÍGENO - PERIODO 2



Recomendaciones

13. Se recomienda establecer un punto de muestreo en la entrada principal a Pinilla (río Lozoya) en el monitoreo que lleva a cabo Canal de Isabel II.
14. Se recomienda tomar las medidas necesarias para la limitación severa de las cargas de amonio desde el efluente de la depuradora de Pinilla.
15. Para aplicar medidas de mitigación en la cuenca, sería muy importante conocer los detalles del ciclo del agua en los núcleos de Lozoya y, sobretodo, Rascafría y urbanizaciones cercanas a Pinilla, para saber si hay vertidos no tratados o limitaciones graves en las redes de alcantarillado o conexión con las depuradoras.

2. Introducción



2.1. ANTECEDENTES

Por acuerdo del Consejo de Gobierno de la Comunidad de Madrid, con fecha 1 de julio 2012, se constituyó Canal de Isabel II Gestión, S.A., teniendo como cometido la prestación de los servicios de abastecimiento, saneamiento y reutilización, incluyendo la atención a los usuarios y la actividad comercial, y manteniendo la designación Canal de Isabel II, para el ente público responsable de la gestión del ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid. (A lo largo de este documento se emplearán ambas denominaciones para designar a la empresa).

Canal de Isabel II Gestión garantiza la calidad del agua suministrada y gestiona la compleja red de infraestructuras que conforman el sistema de abastecimiento, tratamiento, distribución y saneamiento del que es responsable. La Empresa abastece a casi 6 millones de habitantes de la Comunidad de Madrid. Para proporcionar el volumen de agua necesario para ello, se cuenta con las aportaciones de 7 ríos de la sierra del Guadarrama: Alberche, Guadarrama-Aulencia, Guadalix, Manzanares, Lozoya, Jarama y Sorbe, utilizándose también los principales acuíferos de la región: el detrítico terciario y las calizas de Torrelaguna.

La compañía abastecedora cuenta con una serie de instalaciones, entre las que destacan 14 embalses, con una capacidad total de almacenamiento de agua de 945,9 hm³. Los cinco embalses situados en la cuenca del río Lozoya (Pinilla, Riosequillo, Puentes Viejas, El Villar y El Atazar) constituyen uno de los ejes principales en cuanto al almacenamiento del recurso gestionado por Canal de Isabel II. En general, el agua para abastecimiento que aportan estos embalses es de buena calidad, ya que una buena parte del recurso se capta en la presa de El Atazar, después de que gran parte del agua que allí se almacena haya recorrido los otros cuatro embalses de la cuenca.

El embalse de Pinilla, sufre un proceso de eutrofización evidente. Se entiende por eutrofización la proliferación masiva de algas en las capas superficiales de un embalse debido al aporte excesivo de sales nutrientes desde la cuenca. Aparte de suponer un problema estético y operacional, ya que enriquece el agua en materia orgánica, esto tiene otras consecuencias negativas. Destacan la generación de capas anóxicas en el fondo, la liberación de metales desde el sedimento, olores desagradables y el empobrecimiento de la fauna piscícola.

2.2. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

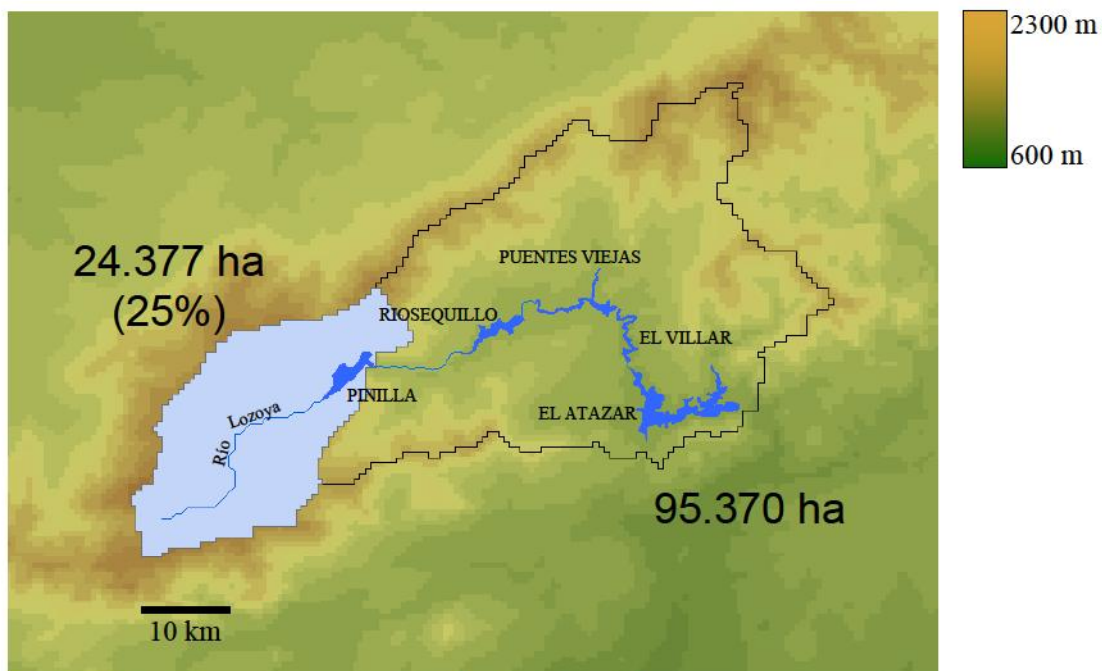
Los problemas de calidad detectados, mediante el seguimiento limnológico de los embalses de la cuenca del Lozoya, ponen de manifiesto la necesidad de incorporar la cuenca hidrográfica del sistema de embalses en el estudio de la calidad del agua que suministran.

Estudios de este tipo permiten conocer las fuentes de nutrientes y materia orgánica que pueden ser la causa última de los procesos que afectan negativamente a calidad del agua, así como proponer un plan de saneamiento para la cuenca, que incida de forma eficiente en aquellas actuaciones que más están contribuyendo al empeoramiento del agua embalsada río abajo. Del mismo modo, posibilitan la elaboración de herramientas para predecir el impacto de las aguas de escorrentía en la calidad del agua embalsada, y que anticipen episodios como las floraciones masivas de algas.

El estudio de los procesos a escala de cuenca demanda un esfuerzo considerable, ya que hay que poner a punto y mantener una red de muestreo a lo largo de la cuenca durante, como mínimo, un año hidrológico. Dadas las dimensiones de la cuenca de los embalses del sistema Lozoya, parece apropiado diseñar primero un estudio restringido a la cuenca de uno de los embalses. En el futuro, se pueden utilizar los resultados obtenidos en este estudio para diseñar un programa eficiente que abarque toda la cuenca o que se pueda aplicar a otras localizaciones.

El embalse de Pinilla es el sistema ideal para este primer estudio a escala de cuenca. Se trata del primer embalse de la serie, con lo que el efecto de la cuenca en la calidad del agua embalsada no se mezcla con los efectos de embalses situados aguas arriba. Además, la cuenca del embalse de Pinilla supone el 25 por ciento del total de terreno drenado por los cinco embalses de la serie (Figura 11). Finalmente, el embalse de Pinilla sufre un proceso de eutrofización que sería deseable reducir. Para ello es imprescindible un conocimiento detallado de los procesos a escala de cuenca involucrados, a fin de proponer medidas correctoras.

FIGURA 11. CUENCA DE LOS EMBALSES DEL SISTEMA LOZOYA



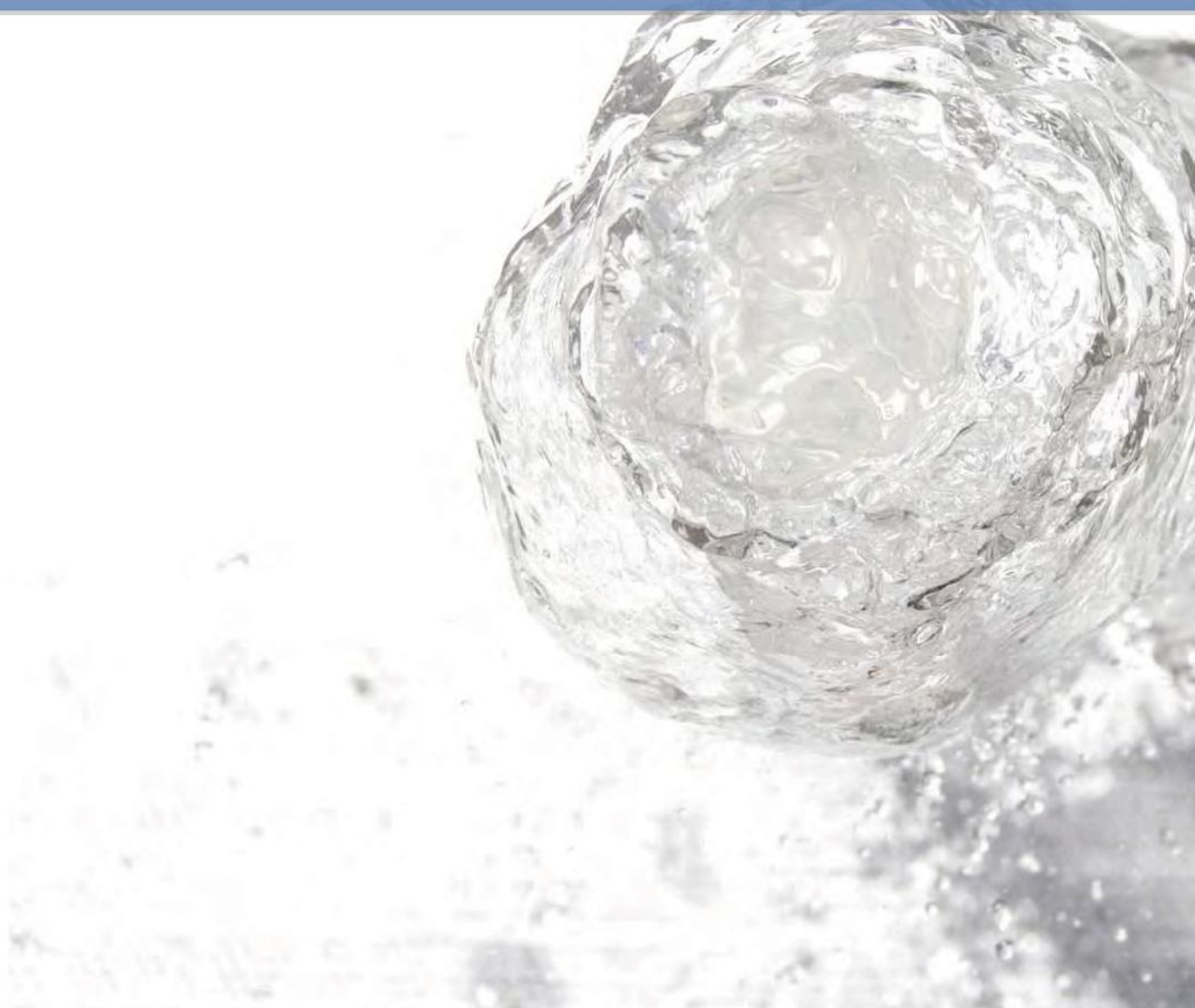
En azul se destaca la cuenca correspondiente al embalse de Pinilla

2.3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos que se plantean en este estudio son los siguientes:

1. Establecer el balance de nutrientes y materia orgánica en la cuenca del embalse de Pinilla sobre la información recogida en el campo durante un año hidrológico.
2. Modelar las cargas de nutrientes y materia orgánica al embalse de Pinilla mediante modelos conceptuales a escala de cuenca.
3. Asignar el origen de nutrientes y materia orgánica en aportes difusos y puntuales. Distribución geográfica de las cargas.
4. Modelar empíricamente la respuesta del embalse a las cargas de nutrientes y materia orgánica. Incidencia en el proceso de eutrofización.
5. Generar escenarios y propuestas de medidas de restauración para mitigar el proceso de eutrofización del embalse de Pinilla.
6. Modelar empíricamente la composición fitoplanctónica del embalse, como primer paso para el control de las floraciones de poblaciones planctónicas problemáticas.

3. Establecimiento del balance de nutrientes y materia orgánica en la cuenca del embalse de Pinilla



El primer paso para el estudio del efecto de los aportes desde la cuenca en el proceso de eutrofización del embalse de Pinilla ha consistido en la elaboración de un balance de nutrientes y materia orgánica en la cuenca del embalse. Este balance permite realizar una primera estimación del impacto de las diversas actividades humanas en el embalse, así como de la capacidad de autodepuración de la cuenca de drenaje. Del mismo modo, sus resultados son útiles para la posterior comparación con los de los modelos a escala de cuenca.

Para poder conseguir este primer objetivo se realizaron toda una serie de trabajos que se detallan a continuación.

3.1. DISEÑO Y PUESTA A PUNTO DE UNA RED DE MUESTREO EN EL CAMPO

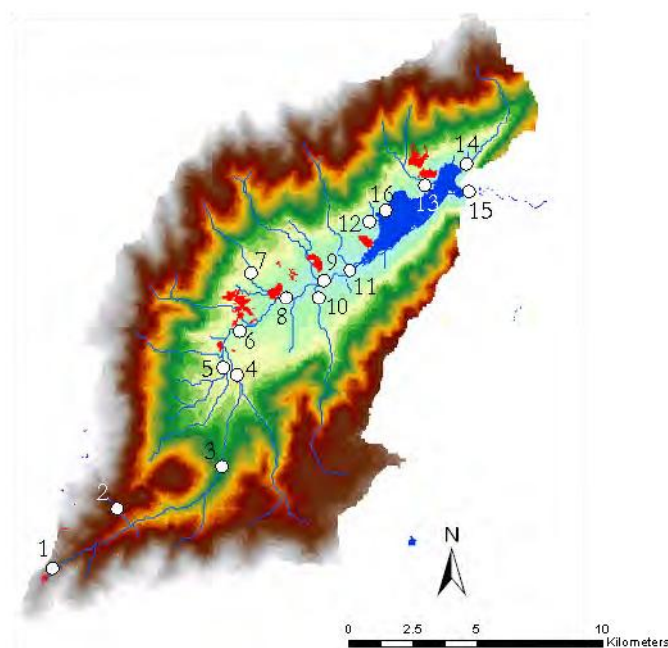
Para establecer la red de muestreo en el campo, en la primavera de 2010 se realizó una primera inspección del terreno. De forma previa a la inspección, ya habían sido propuestos una serie de puntos sobre cartografías temáticas, teniendo en cuenta los aportes potenciales desde cada tributario en relación al uso del suelo predominante.

Como resultado final, se localizaron 15 estaciones de muestreo a lo largo de todos los cursos fluviales de la cuenca (Figura 12). Además, hay que añadir el efluente de la EDAR de Pinilla del Valle, que vierte directamente al embalse de Pinilla. Este número de puntos de muestreo se consideró óptimo de acuerdo a los requerimientos de los modelos a escala de cuenca aplicados en este estudio.

FIGURA 12. LOCALIZACIÓN DE LAS 16 ESTACIONES DE MUESTREO EN LA CUENCA DE PINILLA

Estaciones de Muestreo Pinilla

- | | |
|--------------------------|------------------------------|
| 1 Río Angostura | 9 Río Lozoya |
| 2 Arroyo de Peñalara | 10 Arroyo de Santa Ana |
| 3 Río Angostura | 11 Río Lozoya |
| 4 Río Angostura | 12 Río Pinilla |
| 5 Río Umbría | 13 Arroyo del Palomar |
| 6 Río Angostura | 14 Arroyo del Villar |
| 7 Arroyo de la Artiñuela | 15 Salida embalse de Pinilla |
| 8 Río Lozoya | 16 Efluente EDAR de Pinilla |



3.2. RECOGIDA DE MUESTRAS

Se realizaron un total de 25 muestreos durante el período comprendido entre el 22 de julio de 2010 y el 20 de julio de 2011, con una periodicidad aproximada de 15 días. La recogida de muestras en el campo fue llevada a cabo por miembros de Canal de Isabel II. Así mismo, en la primera de ellas también participaron miembros del equipo de trabajo de FLUMEN, que verificaron la compatibilidad de los protocolos utilizados durante la recolección con los utilizados por el consultor para los análisis de los datos. La recogida de muestras en cada punto consistió en:

- Desplazamiento al punto de muestreo.
- Anotación de incidencias (meteorología, estado del cauce, signos evidentes de perturbación, etc.).
- Medida de parámetros in situ mediante sondas de campo (temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica del agua).
- Recogida de muestras de agua del río para su posterior análisis en el laboratorio.
- Estimación del caudal del río. Estas medidas se tomaron en 6 muestreos, con una periodicidad entre 2 y 3 meses, en los puntos donde las condiciones ambientales así lo permitieron.

3.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO

A partir de las muestras recolectadas en campo, los técnicos de la Empresa analizaron el agua en sus instalaciones siguiendo los protocolos establecidos en cada caso en los laboratorios de Canal de Isabel II para determinar la concentración de los compuestos reflejados en la tabla 5.

TABLA 5. PARÁMETROS MEDIDOS POR EL DEPARTAMENTO DE AGUAS NATURALES

<i>Parámetro</i>	<i>Unidades</i>	<i>Método</i>
Temperatura	° C	Sonda de temperatura
Oxígeno disuelto	mg/L y % de saturación	Valoración por método de Winkler
pH	Unidades de pH	Método potenciométrico
Conductividad	µS/cm	Método eléctrico
Ortofosfato	mg/L	Colorimetría
Amonio	mg/L	Colorimetría
Nitritos	mg/L	Colorimetría
Nitratos	mg/L	Colorimetría
Manganeso disuelto	µg/L	Colorimetría
Hierro total	mg/L	Colorimetría
Potencial Redox	mV	Método potenciométrico
Turbidez	U.N.F	Método Nefelométrico
Color	mg/L	Método Visual
Cloruros	mg/L	Colorimetría
Sílice	mg/L	Colorimetría
DQO	mg/L	Oxidación por permanganato
Sólidos en suspensión	mg/L	Secado y pesada

Por otra parte, los técnicos de Canal de Isabel II prepararon varios recipientes con muestras de agua de los puntos de muestreo, según las indicaciones recibidas del consultor.

Estos recipientes fueron enviados a las instalaciones del consultor en Barcelona, para determinar la concentración en las muestras de los siguientes compuestos:

Establecimiento del balance de nutrientes y materia orgánica en la cuenca del embalse de Pinilla

- a) Fósforo total. Digestión en medio alcalino (Persulfato de sodio) de una muestra no filtrada en autoclave TRADE RAYPA AES-75 a 115°C (Grasshoff et al. 1983), y determinación colorimétrica del fosfato liberado en espectrofotómetro SHIMADZU PharmaSpec UV-1700 a 890 nm, según Murphy y Riley (1962).
- b) Nitrógeno total. Digestión en medio alcalino (Persulfato de sodio) de una muestra no filtrada en autoclave TRADE RAYPA AES-75 a 115°C (Grasshoff et al. 1983), y determinación colorimétrica del nitrato liberado en espectrofotómetro SHIMADZU PharmaSpec UV-1700.
- c) Carbono orgánico disuelto. Combustión de la muestra y lectura por infrarrojos, después de la purga de carbono inorgánico disuelto por acidificación de la muestra a pH 2 en un Total Organic Carbon Analyzer Shimadzu TOC-VCSH.
- d) Carbono orgánico particulado. Análisis elemental en un Elemental Analyzer 1500 Carlo Erba sobre filtro de fibra de vidrio previamente acidificado para eliminar carbono particulado inorgánico.
- e) Nitrógeno Orgánico particulado. Análisis elemental en un Elemental Analyzer 1500 Carlo Erba sobre filtro de fibra de vidrio.
- f) Análisis espectroscópico de la materia orgánica disuelta. Análisis de la respuesta espectroscópica de una muestra filtrada a 0,7 micras en una matriz de excitación-emisión de 200 a 600 nm, en un espectrofotómetro de fluorescencia HITACHI F-7000.
- g) Alcalinidad del agua, en un titrador automático Metrohm 672.

A su vez, en las muestras recogidas durante la última salida de campo (20 de julio de 2011) se realizó un experimento para la determinación de la biodegradabilidad de la materia orgánica en los puntos de muestreo.

3.4. ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DEL RÍO Y EXTRAPOLACIÓN A PUNTOS AFORADOS OCASIONALMENTE, O NO AFORADOS

A lo largo del período de muestreo, se realizaron seis estimaciones de caudal en los puntos en los que las condiciones ambientales (velocidad del agua, profundidad máxima) lo permitieron. En algunas ocasiones, sobre todo en verano, algunos cauces estaban secos, mientras que en invierno y primavera los puntos de muestreo en el canal principal del río Lozoya llevaban un caudal excesivo para ser medido con este método. La metodología empleada consistió en la realización de un transecto transversal al eje del cauce (Figura 13), registrando los valores de profundidad y velocidad del flujo –mediante molinete– a intervalos conocidos. Este intervalo se determinó en función de la anchura del cauce, variando entre 15 centímetros y un metro. Con estos valores, y considerando el flujo como un conjunto de segmentos trapezoidales, se calculó el caudal medio para cada punto y muestreo, que presentan un rango que va desde 0,012 a 0,972 m³ s⁻¹.

Por otra parte, el caudal total diario entrado al embalse de Pinilla (punto 15) fue proporcionado por Canal de Isabel II, quien lo obtuvo mediante el balance de agua en el embalse. Tomando estos valores como referencia, se calculó el caudal en cualquier día del periodo de muestreo en los puntos aforados mediante la metodología del Drainage-Area Ratio (Emerson et al., 2005). Este método utiliza la relación de áreas entre el punto aforado de forma continua y el punto aforado de forma ocasional para construir en éste último una serie continua:

$$Q_2 = K_{\text{mean}} Q_1 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{\Phi_{\text{mean}}}$$

Donde Q_2 es el caudal diario de un día determinado en el punto aforado ocasionalmente, Q_1 es el caudal de referencia (en nuestro caso, el caudal de entrada a Pinilla) aquel día, A_1 y A_2 son las áreas de las cuencas correspondientes, y K_{mean} y Φ_{mean} son dos parámetros a calcular de forma empírica.

FIGURA13. DIFERENTES MOMENTOS DEL PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DEL CAUDAL, EN DOS TRAMOS DE CARACTERÍSTICAS CONTRASTADAS EN LA CUENCA DE PINILLA



Izquierda: Punto 1. Derecha: Punto 9

Para cada día, con valores de caudal en el punto aforado ocasionalmente se calculan las siguientes magnitudes:

$$\Phi = \frac{\log\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)}{\log\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}$$

Siendo Φ_{mean} el valor medio de Φ de todos los muestreos en ese punto, con lo que se calcula de forma subsiguiente los siguientes valores para cada pareja de datos:

$$K_{12} = \frac{Q_1 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^{\Phi_{\text{mean}}}}{Q_2}$$

$$K_{21} = \frac{Q_2 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\Phi_{\text{mean}}}}{Q_1}$$

$$K_{\text{mean}} = \overline{K_{12} K_{21}}$$

Donde K_{12} y K_{21} son los promedios de K_{12} y K_{21} para todos los muestreos en ese punto, siendo entonces K_{mean} el promedio de K_{12} y K_{21} .

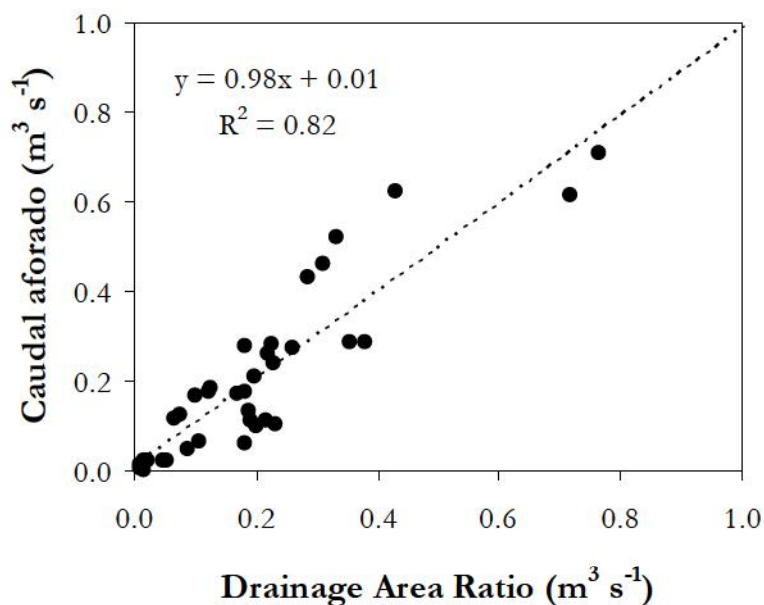
En la tabla 6 se pueden consultar los valores para Φ_{mean} y K_{mean} que permiten reconstruir la serie diaria de caudal, para cada punto, utilizando el caudal entrado a Pinilla como referencia.

TABLA 6. VALORES DE Φ_{MEAN} Y K_{MEAN} CALCULADOS PARA CADA PUNTO DE MUESTREO

	Φ	K
Punto 1	0,81	1,18
Punto 2	0,83	1,03
Punto 3	0,29	1,00
Punto 4	1,47	1,26
Punto 5	0,85	1,12
Punto 6	1,50	1,13
Punto 7	0,87	1,00
Punto 8	0,73	1,14
Punto 9	1,66	1,16
Punto 10	1,03	1,04
Punto 11	1,45	1,21
Punto 12	1,04	1,03
Punto 13	1,31	1,88
Punto 14	1,47	1,28

En la figura 14, se puede comprobar la correlación entre los datos de caudal aforados en los puntos de muestreo y el caudal calculado mediante el método explicado.

FIGURA 14. RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE CAUDAL MEDIDOS EN CADA PUNTO Y LOS VALORES OBTENIDOS MEDIANTE EL DRAINAGE-AREA RATIO



De la misma forma, estos cálculos permiten estimar el caudal diario en cualquier punto no aforado de la cuenca. Esto se hizo así para las 84 subcuencas con las que trabajó el modelo SPARROW (ver epígrafe 4.1). Para ello, se asignó a cada cuenca los coeficientes Φ_{mean} y K_{mean} de algunos de los puntos muestreados, cuidando que fueran los más próximos y de características similares.

3.5. CÁLCULO DE BALANCES POR SUBCUENCAS

En esta sección se exponen los resultados del cálculo de cargas de nutrientes registradas en cada uno de los puntos de muestreo. Estos resultados permiten identificar cuáles son las subcuencas en las que tienen una mayor importancia, tanto los aportes propios de la cuenca, como los procesos de autodepuración. Por otra parte, para cada compuesto se ha calculado el balance de entradas al embalse de Pinilla y la contribución a éstas que realiza cada uno de los puntos de muestreo directamente involucrados.

En primer lugar, se expone una introducción de la metodología empleada en el cálculo de las cargas, y se ofrece una comparativa general de los resultados obtenidos empleando otro método distinto (Adaptative Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) como forma de validación de los resultados. Sigue una exposición pormenorizada de los resultados para cada nutriente, así como de un resumen de los principales hallazgos.

3.5.1. Metodología

Para realizar el cálculo de las cargas de nutrientes se ha empleado el paquete LOADEST. Desarrollado por el U.S. Geological Survey. LOADEST es un programa FORTRAN que, a través de una serie temporal de caudales y de las concentraciones de los compuestos medidas en cada muestreo, realiza una regresión para calcular las cargas de nutrientes en cada punto, a lo largo del período de estudio.

De las tres opciones que ofrece LOADEST, el método estadístico seleccionado para evaluar los resultados ha sido el Adjusted Maximum Likelihood Estimation, (AMLE). Este método se consideró el más apropiado, de acuerdo a las características de los datos disponibles (distribución normal de los mismos y ausencia de alguno de ellos). Entre los resultados que ofrece AMLE se encuentra, además de la carga media, el intervalo de confianza del 95 por ciento.

Por otra parte, LOADEST puede utilizar hasta 9 modelos de regresión distintos. En el caso que nos ocupa, se utilizó la opción de selección automática del modelo, mediante la cual se evalúa cuál de ellos es el más adecuado para cada cálculo de carga. Posteriormente, se certifica la validez del modelo inspeccionando visualmente los resultados, atendiendo especialmente a la forma de la relación caudal vs. concentración de compuesto. En la tabla 7 se ofrece un resumen de los modelos empleados para cada punto y nutriente, así como del coeficiente de regresión asociado en cada cálculo de cargas.

LOADEST ofrece la opción de calcular las cargas medias para subperíodos de tiempo definidos por el usuario. En este caso, se establecieron tres períodos basado en la serie de caudal (como ejemplo de estos datos, en la figura 15 se muestran los calculados para el Punto 11). El primero de estos períodos comienza el 12 de julio de 2010 y llega hasta el 28 de octubre del mismo año. Son 109 días que se caracterizan por un caudal muy bajo y estable. El segundo de ellos abarca 109 días, desde el 29 de octubre de 2010 hasta el 14 de febrero de 2011, y se caracteriza por un aumento del caudal basal y una serie de picos que tienden a estabilizarse hacia finales de enero. El último de los tres períodos comprende 147 días, y va desde el 15 de febrero hasta el 11 de julio. Durante este tiempo el caudal crece considerablemente, registrando los valores máximos en los meses de abril y mayo, momento en el cual los caudales descienden bruscamente para situarse en los niveles mínimos de principios de verano.

TABLA 7. MODELOS SELECCIONADOS Y COEFICIENTES DE REGRESIÓN PARA CADA PUNTO Y PARÁMETRO

	Modelo	R ²	Modelo	R ²	Modelo	R ²	Modelo	R ²
	Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4	
P total	8	91,03	1	83,47	3	95,32	2	91,09
N total	6	97,81	1	94,54	9	98,1	1	95,82
N tpart	9	92,04	1	80,08	9	90,11	2	84,11
C tpart	8	92,72	2	84,36	2	90,68	1	90,39
DOC	8	97,57	3	96,73	3	93,94	3	93,34
Amonio	4	91	4	91	4	91	2	95
DQO	1	91,7	1	95,15	1	93,97	1	93,74
Nitrato	3	96,85	7	88,73	5	97,35	1	92,88
Fosfato	8	94,8	7	95,17	9	99,56	-	-
Hierro	4	55,95	1	75,32	2	74,17	2	66,36
Manganeso	1	44,04	1	90,97	1	80,92	1	73,54
Cloruros	1	72,78	1	52,81	4	96,1	4	95,61
Silicatos	3	97,09	6	99,27	8	99,69	9	99,62
	Modelo	R ²	Modelo	R ²	Modelo	R ²	Modelo	R ²
	Punto 5		Punto 6		Punto 7		Punto 8	
P total	5	87,6	2	80,8	1	86,2	2	67,41
N total	1	92,22	1	93,78	6	98,39	2	87,97
N tpart	5	89,42	6	90,26	2	87,92	2	64,82
C tpart	2	90,82	2	92,2	2	87,87	2	73,75
DOC	3	96,7	3	94,32	9	97,82	3	93,87
Amonio	4	94	4	94	1	49	7	93
DQO	3	90,44	2	89,88	1	93,08	2	80,85
Nitrato	9	89,21	9	94,96	4	96,96	4	93,04
Fosfato	9	85,34	2	75,73	-	-	5	90,01
Hierro	3	62,3	2	76,99	1	81,51	2	68,52
Manganeso	3	92,89	3	92,75	1	80,16	1	84,72
Cloruros	1	67,35	1	83,28	1	57,51	1	70,88
Silicatos	1	99,08	6	99,56	1	98,94	1	98,84
	Modelo	R ²	Modelo	R ²	Modelo	R ²	Modelo	R ²
	Punto 9		Punto 10		Punto 11		Punto 12	
P total	4	86,8	3	83,44	7	96,42	4	82,2
N total	9	97,81	7	98,35	9	98,29	5	96,37
N tpart	2	72,2	3	82,38	3	93,3	8	90,48
C tpart	6	80,84	3	84,56	1	93,67	8	94,99
DOC	7	97,97	4	98,65	9	93,84	4	89,41
Amonio	4	90	9	82	4	81	4	89
DQO	7	94,8	4	93,43	1	92,87	4	91,09
Nitrato	9	94,72	9	98,65	9	98,62	4	96,49
Fosfato	3	90,16	-	-	6	93,41	-	-
Hierro	8	85,58	3	72,14	4	84	3	84,27
Manganeso	3	88,37	1	77,57	9	98,45	7	99,5
Cloruros	1	90,54	1	73,4	1	82,39	1	54,36
Silicatos	1	98,51	3	98,56	9	99,85	7	99,5

(Continúa la tabla en página siguiente...)

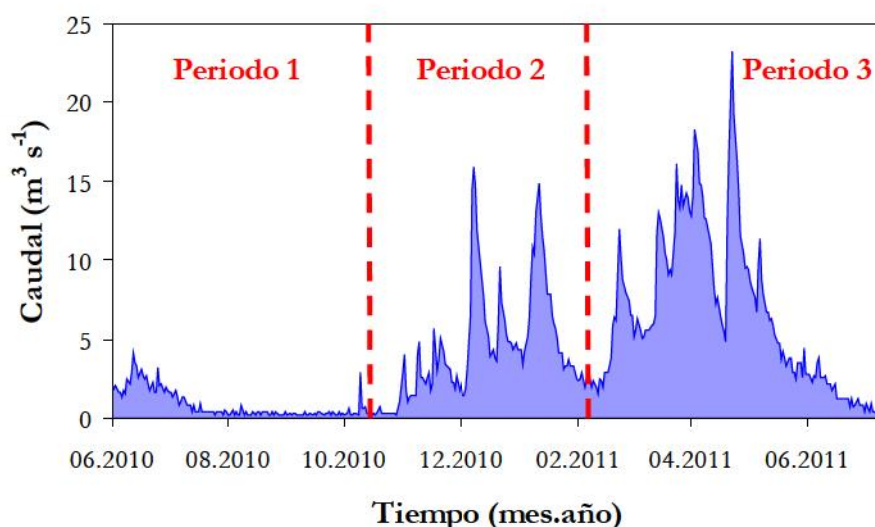
TABLA 7. MODELOS SELECCIONADOS Y COEFICIENTES DE REGRESIÓN PARA CADA PUNTO Y PARÁMETRO

(Continuación de la tabla de la página anterior)

	Modelo	R ²	Modelo	R ²	Modelo	R ²	Modelo	R ²
	Punto 13		Punto 14		Punto 15		Punto 16	
P total	2	55,87	7	95,92	7	84,17	2	17,26
N total	2	80,3	1	97,62	4	98,31	1	0,61
N tpart	2	73,97	4	96,08	3	75,83	1	3,72
C tpart	2	82,26	4	96,55	1	74,49	1	6,11
DOC	3	97,22	3	98,21	3	99,07	7	48,31
Amonio	1	69	4	94	4	80	1	8
DQO	3	88,91	4	97,41	4	99,4	7	52,67
Nitrato	6	79,85	9	92,57	4	86,85	4	52,24
Fosfato	1	29,38	7	97,12	4	66,32	8	68,14
Hierro	1	78,9	6	93,46	6	67,28	4	18,69
Manganeso	1	95,79	1	94,92	9	59,5	1	4,76
Cloruros	2	69,2	1	76,27	1	97,74	1	5,06
Silicatos	3	97,37	3	98,82	9	94,51	1	61,15

En el caso del Nitrito, la mayor parte de resultados para los puntos de la cuenca fueron por debajo del límite de detección, por lo que LOADEST no pudo realizar los correspondientes cálculos de cargas

FIGURA 15. SERIE DE CAUDAL CALCULADA PARA EL PUNTO 11, CON INDICACIÓN DE LOS TRES PERIODOS ADICIONALES AL PERIODO COMPLETO CONSIDERADOS PARA EL CÁLCULO DE CARGAS



3.5.2. Comparación de los resultados entre LOADEST y ANFIS

De forma paralela al cálculo de cargas de nutrientes con LOADEST, se realizaron los mismos cálculos con una herramienta desarrollada por el consultor, basada en los Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (Marcé et al. 2004). De esta manera, se dispuso de dos estimaciones independientes con sus respectivas incertidumbres, que han permitido validar los resultados obtenidos.

El cálculo de cargas con este sistema, especialmente diseñado para su uso en situaciones de impactos humanos variables en el tiempo, se basa en el uso de la lógica difusa y los sistemas de calibración automática desarrollados para las redes neuronales. Se trata, en resumen, de construir un sistema de inferencia de lógica difusa que dibuje la relación caudal vs. concentración del constituyente que mejor se adapte a los datos recogidos en el campo. Se evita así tener que definir un modelo a priori para esta relación o, como en el caso de LOADEST, tener que testar varios modelos alternativos. El sistema está programado para calcular la incertidumbre del cómputo de cargas mediante la utilización de un sistema de remuestreo tipo *bootstrap*, y se incluyen estrategias para evitar la pérdida de generalización de los resultados por exceso de calibración en un set de datos local. En el artículo científico citado anteriormente, se pueden consultar todos los detalles de este método, incluyendo ejemplos numéricos y tutoriales para introducirse en la inferencia difusa. Se desarrollaron cálculos para siete de los constituyentes analizados en este estudio (DQO, hierro, nitrato, fósforo y nitrógeno total, silicato y DOC).

A continuación, se presenta la comparativa para algunos de los constituyentes analizados en este estudio entre las cargas, en los 15 puntos de muestreo situados en la cuenca, calculadas mediante LOADEST y las calculadas con el sistema ANFIS para el periodo completo. En general, los resultados de la comparativa tienen conclusiones idénticas para todos los constituyentes. Como se puede apreciar, la comparación entre las dos metodologías es muy buena, con altas correlaciones (Figuras 16, 17 y 18), y con rangos de valores en los que la discrepancia es muy pequeña (Figuras 19 y 20). Se considera, por lo tanto, que el cálculo de cargas con LOADEST es fiable, y que la elección de distintos modelos para el cálculo de cargas no es un hecho relevante a la hora del cálculo. Se utilizarán, por lo tanto, las cargas calculadas con LOADEST en el resto de análisis de este estudio.

FIGURA 16. COMPARATIVA ENTRE LOS RESULTADOS DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE NITRÓGENO TOTAL (NT), OBTENIDOS MEDIANTE ANFIS Y LOADEST EN LOS PUNTOS DE MUESTREO 1 A 15

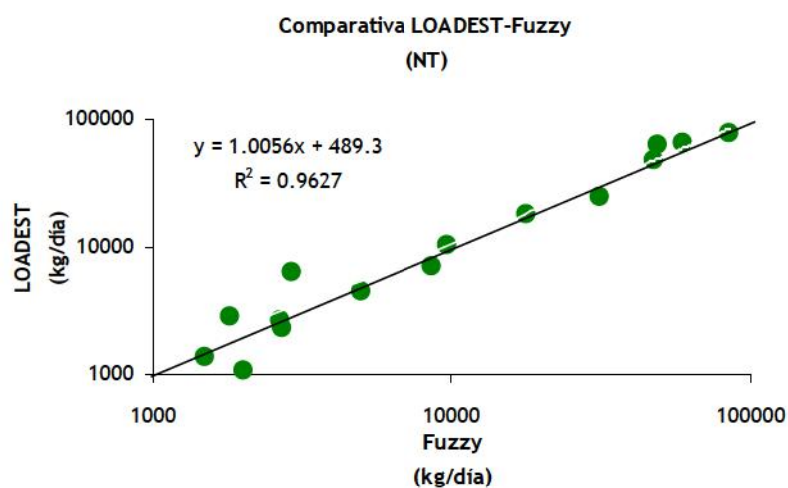


FIGURA 17. COMPARATIVA ENTRE LOS RESULTADOS DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO (DOC), OBTENIDOS MEDIANTE ANFIS Y LOADEST EN LOS PUNTOS DE MUESTREO 1 A 15

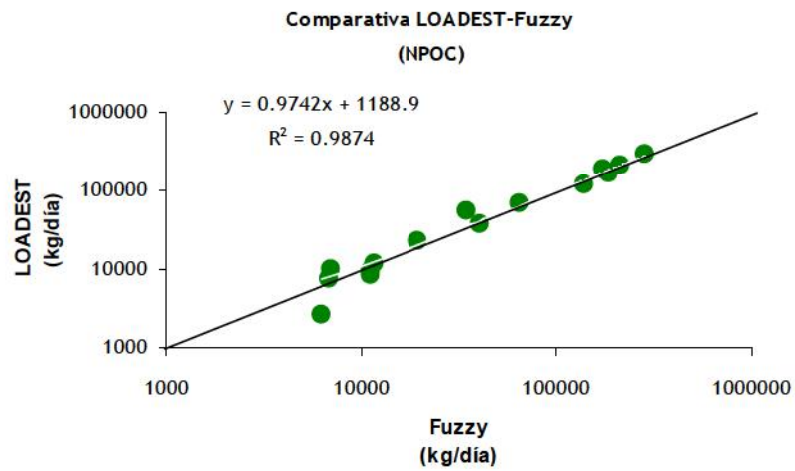


FIGURA 18. COMPARATIVA ENTRE LOS RESULTADOS DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE SÍLICE (SiO_2), OBTENIDOS MEDIANTE ANFIS Y LOADEST EN LOS PUNTOS DE MUESTREO 1 A 15

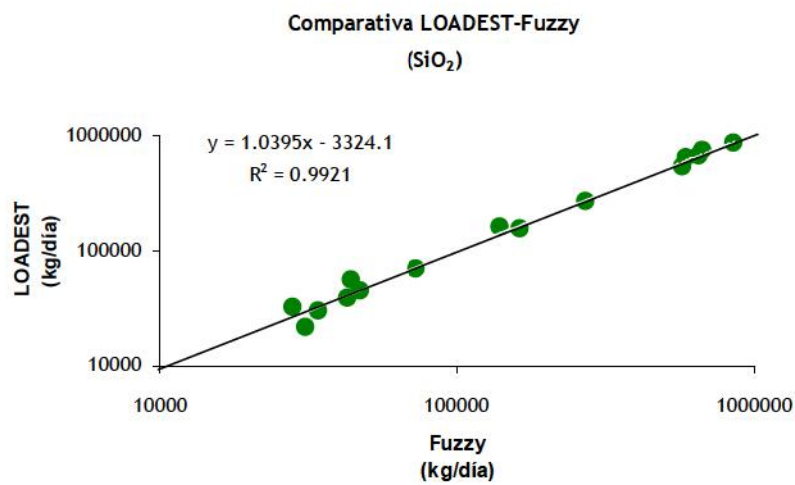
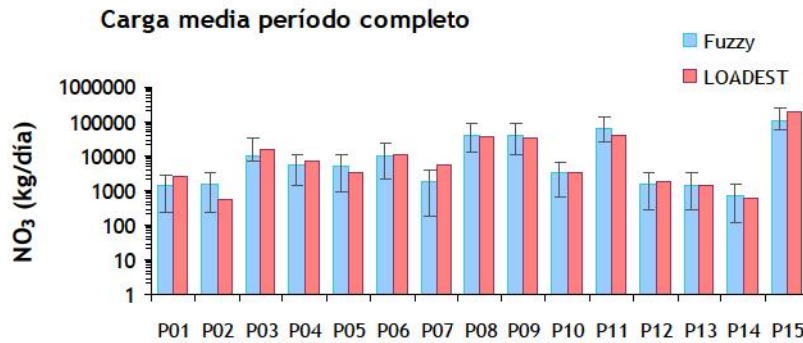
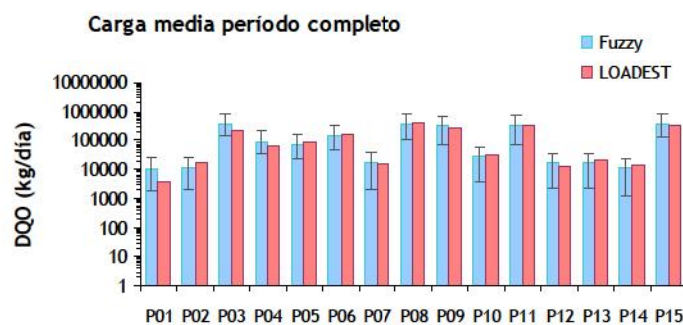


FIGURA 19. COMPARATIVA ENTRE LOS RESULTADOS DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE NITRATO (NO_3), OBTENIDOS MEDIANTE ANFIS Y LOADEST EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MUESTREO SITUADOS EN LA CUENCA



Se detalla la incertidumbre de los resultados de ANFIS calculada mediante *bootstrap*

FIGURA 20. COMPARATIVA ENTRE LOS RESULTADOS DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE DQO, OBTENIDOS MEDIANTE ANFIS Y LOADEST EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MUESTREO SITUADOS EN LA CUENCA



Se detalla la incertidumbre de los resultados de ANFIS calculada mediante *bootstrap*

3.5.3. Distribución de cargas por puntos y períodos; balance y distribución de entradas en el embalse

A continuación se muestran, para cada compuesto analizado, las cargas medias y totales calculadas en cada punto. Para las cargas medias diarias se representa además el intervalo de confianza del 95 por ciento.

Estos mismos resultados también se presentan distribuidos, de acuerdo a los tres períodos reflejados en la figura 15. Además, a efectos de mostrar con mayor detalle la importancia de los aportes difusos y los procesos de autodepuración, se realiza una serie de sub-balances para los puntos que se encuentran en el cauce principal del río Angostura-Lozoya (puntos 3, 4, 6, 8, 9 y 11).

Por último, se efectúa un balance de las cargas en el embalse y se representa el porcentaje con el que contribuyen los puntos directamente involucrados en las entradas.

Se muestran los resultados para los 16 puntos de muestreo. Siguiendo un gradiente aguas arriba – aguas abajo, los puntos situados en el cauce principal son los puntos 1, 3, 4 y 6, para el río Angostura; y los puntos 8, 9 y 11 para el río Lozoya (Angostura y Lozoya son, de hecho, el mismo eje fluvial principal). Los puntos 2, 5, 7 y 10 corresponden a afluentes del cauce principal; mientras que los puntos 12, 13 y 14 corresponden a tributarios directos al embalse. Del mismo modo, el punto 16 (salida de la EDAR) vierte directamente al embalse. Por su parte, el punto 15 corresponde a la salida del embalse. Se puede consultar la distribución detallada de los puntos de muestreo en la figura 12.

3.5.3.1. Fósforo Total

El caso del fósforo total (Figuras 21 y 22), es el primer ejemplo del aumento de cargas aguas abajo. Este aumento, sin embargo, no sigue un patrón progresivo. Mientras que, por un lado, los puntos 3, 6, 8, y 11 muestran un aumento de la carga respecto a las estaciones predecesoras; los puntos 4 y 9 muestran una tendencia inversa, con valores inferiores a los registrados aguas arriba, debido, presumiblemente, al efecto de la autodepuración del río. En cuanto a los aportes propios de la cuenca, es en los puntos 3, 8 y 11 donde parece tener una mayor importancia (Figura 23).

FIGURA 21. CARGA MEDIA DIARIA DE FÓSFORO TOTAL, PERIODO COMPLETO

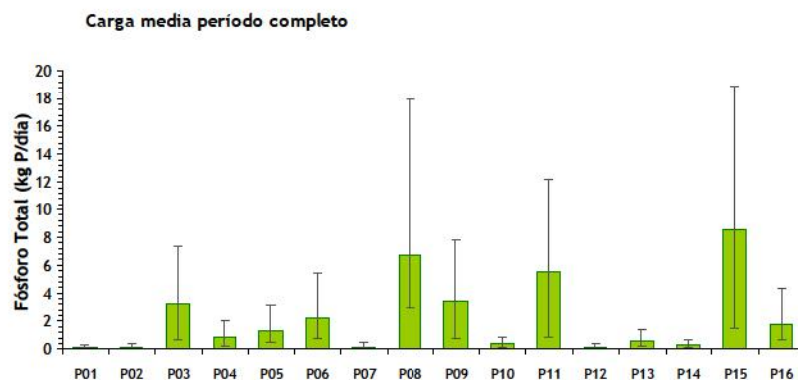


FIGURA 22. CARGA TOTAL DE FÓSFORO TOTAL, PERIODO COMPLETO

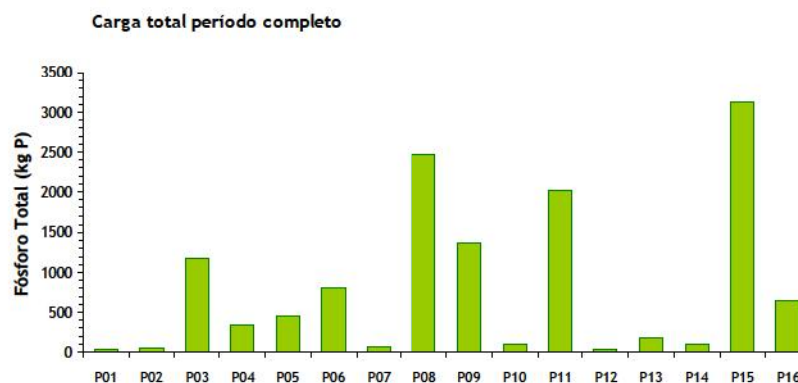
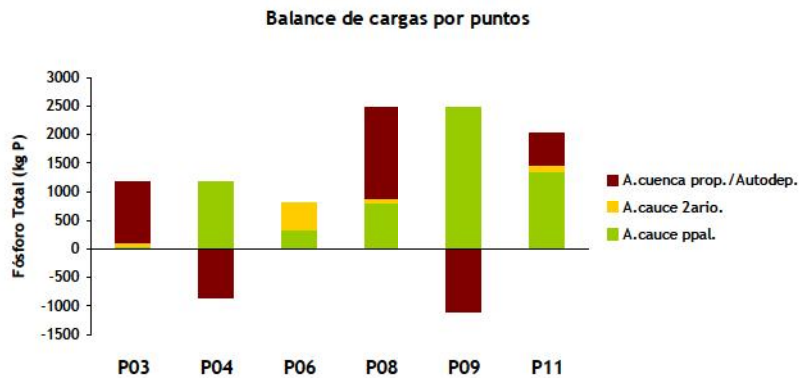


FIGURA 23. BALANCE DE CARGAS DE FÓSFORO TOTAL POR PUNTOS



Para cada una de las estaciones se representa; en color verde, la carga del punto situado inmediatamente aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga de los puntos en cauces secundarios directamente implicados; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

Respecto a la distribución estacional de las cargas de fósforo total, las figuras 24 y 25 muestran una tendencia progresiva para todos los puntos (a excepción de la EDAR) según la cual, las cargas aumentan de un período a otro.

FIGURA 24. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE FÓSFORO TOTAL

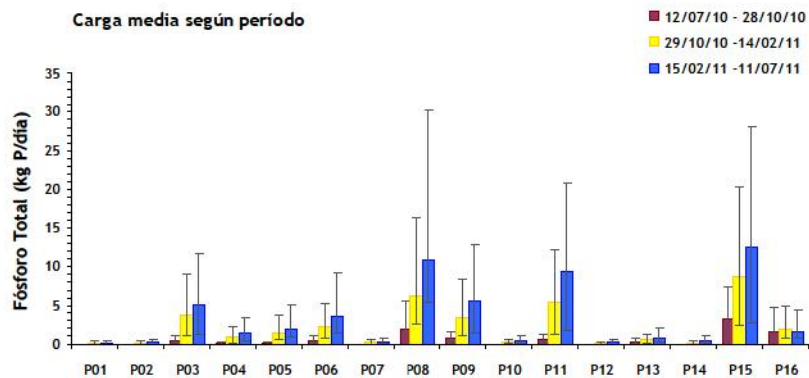
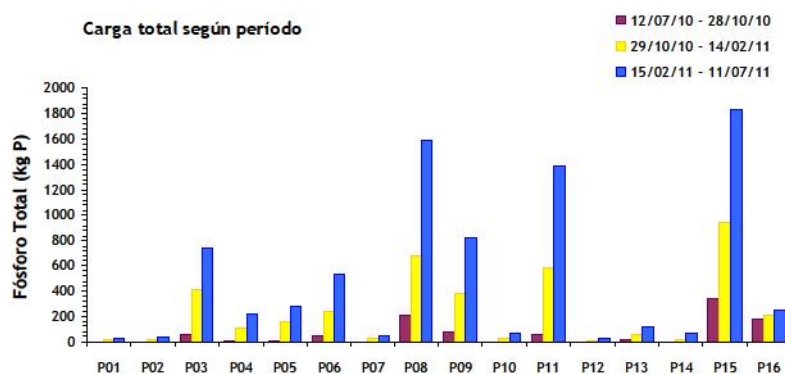


FIGURA 25. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA TOTAL DE FÓSFORO TOTAL



Por último, en lo que al fósforo total respecta, el balance de entradas y salidas del embalse (Tabla 8) muestra que, en términos globales, éste se comportó como un exportador de fósforo, aunque fue sumidero durante el tercer período.

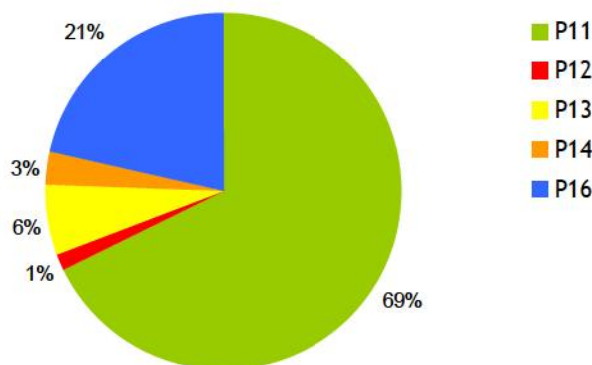
TABLA 8. BALANCE DE CARGAS DE FÓSFORO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg P)
Periodo completo	2.978,0	3.124,4	146,4
12/07/10 – 28/10/10	261,3	347,7	86,4
29/10/10 – 14/02/11	876,2	943,9	67,8
15/02/11 – 11/07/11	1.838,9	1.833,1	-5,8

En cuanto a la distribución de las entradas al embalse, la figura 26 muestra que el mayor contribuyente a lo largo de todo el período es el Punto 11 –río Lozoya- con un 69 por ciento del total de la carga medida, seguido de la EDAR (Punto 16) con un 21 por ciento.

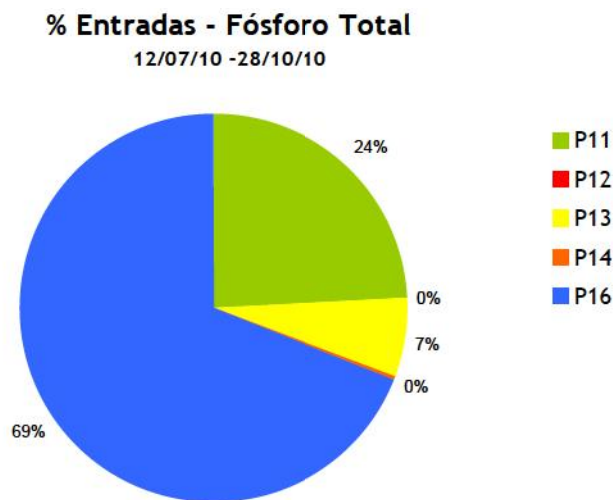
FIGURA 26. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE FÓSFORO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA A LO LARGO DEL PERÍODO DE ESTUDIO

% Entradas - Fósforo Total



Esta relación, sin embargo, se invierte durante el primer período de estudio (Figura 27), donde el principal responsable de los aportes de fósforo total pasa a ser la depuradora, con un 69 por ciento del total de entradas; mientras que el río Lozoya, a través del Punto 11, pasa a aportar el 24 por ciento de las cargas registradas.

FIGURA 27. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE FÓSFORO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA A LO LARGO DEL PERÍODO DE ESTUDIO (12/7/10 – 28/10/10)



3.5.3.2. Nitrógeno Total

Las cargas de nitrógeno total (Figuras 28 y 29) presentan una distribución casi calcada a las del fósforo total. Los puntos del cauce principal que registran un aumento de cargas vuelven a ser el 3, 6, 8, y 11. Por su parte, en los puntos 4 y 9 la carga vuelve a disminuir por el efecto de la autodepuración del río. Las cargas de los afluentes, registradas en los puntos 2, 5, 7 y 10, justifican sólo en parte el incremento de las cargas a lo largo de la cuenca, y los aportes propios de la cuenca parecen ser relevantes en los puntos 3, 8 y 11 (Figura. 30).

FIGURA 28. CARGA MEDIA DIARIA DE NITRÓGENO TOTAL. PERIODO COMPLETO

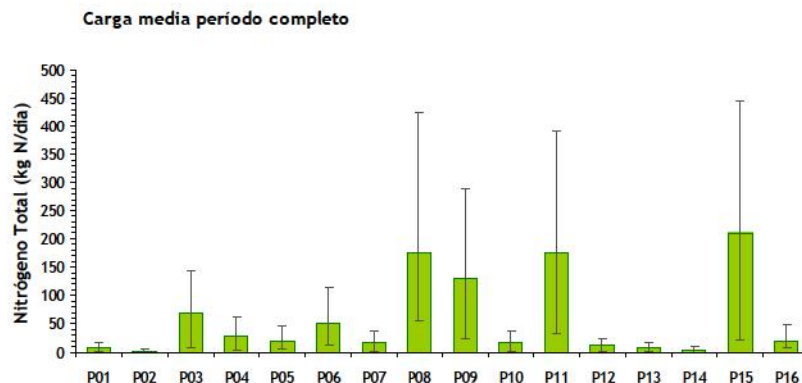


FIGURA 29. CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL. PERIODO COMPLETO

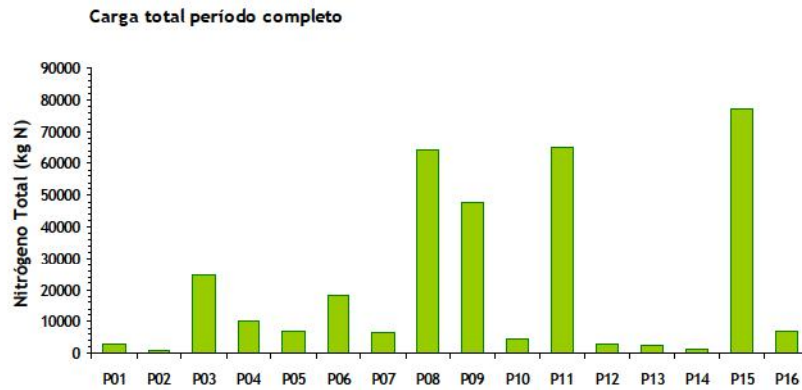
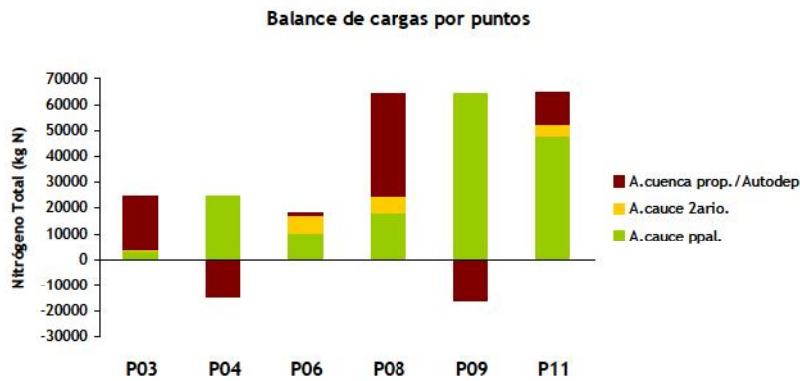


FIGURA 30. BALANCE DE NITRÓGENO TOTAL A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se representa; en color verde, la carga del punto situado inmediatamente aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga de los puntos en cauces secundarios directamente implicados; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

De igual modo, la distribución estacional de las cargas de nitrógeno total (Figuras 31 y 32) muestra un progresivo aumento de la carga en todos los puntos, incluida la EDAR.

FIGURA 31. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS MEDIAS DIARIAS DE NITRÓGENO TOTAL. CARGA MEDIA SEGÚN PERIODO

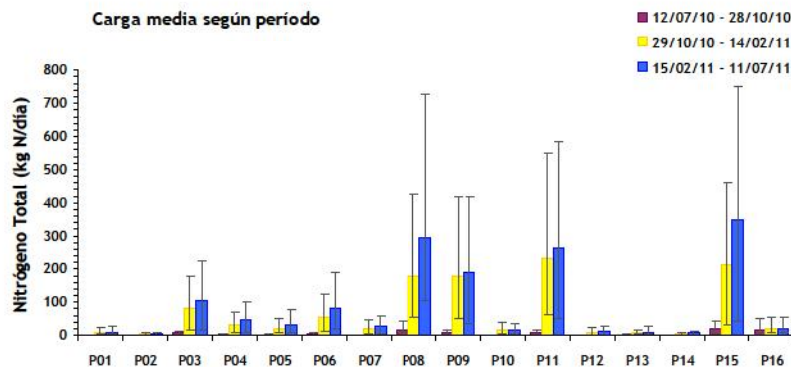
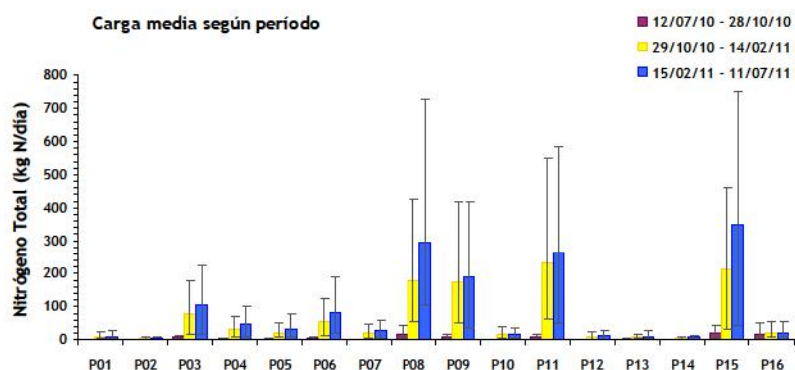


FIGURA 32. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE NITRÓGENO TOTAL



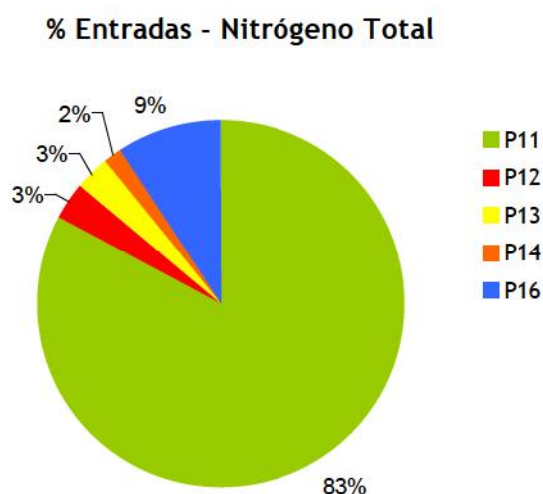
Respecto al balance de entradas y salidas, la tabla 9 muestra que, aunque la diferencia no es muy grande, el embalse se comportó como un sumidero a lo largo de todo el período. Durante el último período, sin embargo, actuó como exportador.

TABLA 9. BALANCE DE CARGAS DE NITRÓGENO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg N)
Período completo	78.303	76.986	-1.317
12/07/10 – 28/10/10	2.761	2.184	-576
29/10/10 – 14/02/11	29.978	23.165	-6.814
15/02/11 – 11/07/11	45.564	51.635	6.071

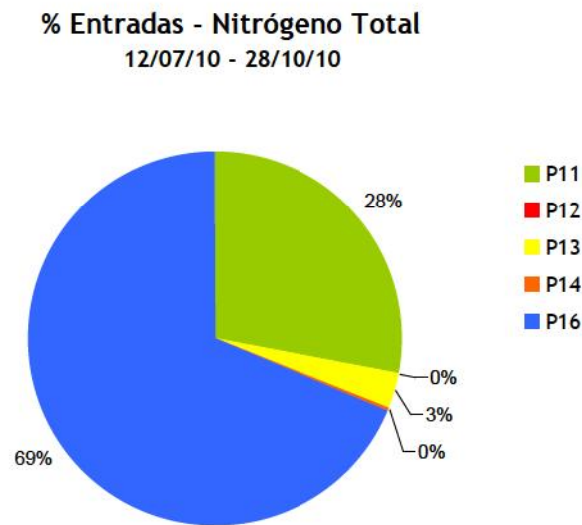
Por su parte, la distribución de las entradas en el embalse a lo largo del período de estudio (Figura 33) muestra un claro predominio de los aportes desde el Punto 11 (83 %), frente al 9 por ciento aportado desde la EDAR.

FIGURA 33. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE NITRÓGENO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA A LO LARGO DEL PERÍODO DE ESTUDIO



La situación vuelve a ser bastante diferente si consideramos sólo los aportes durante el primer período definido, con un 69 por ciento de los aportes procedentes de la EDAR, frente al 28 por ciento del punto 11 (Figura 34).

FIGURA 34. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE NITRÓGENO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA, DURANTE EL PERÍODO (12/07/10 - 28/10/10)



3.5.3.3. Nitrógeno total particulado

El nitrógeno total particulado (Figuras 35 y 36) sigue el mismo patrón que el nitrógeno total: los puntos del cauce principal que registran un aumento de cargas vuelven a ser el 3, 6, 8, y 11. En los puntos 4 y 9 se comprueba el efecto de la autodepuración del río, mientras que las cargas aportadas por los afluentes en los puntos 2, 5, 7 y 10, explican una parte del incremento de las cargas a lo largo de la cuenca, siendo los aportes propios de la cuenca de especial relevancia en los puntos 3, 8 y, en menor medida, en el 11 (Figura 37).

FIGURA 35. CARGA MEDIA DIARIA DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO

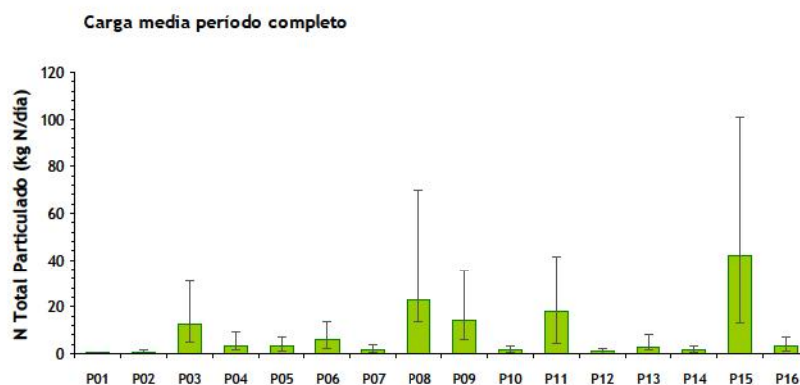


FIGURA 36. CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO

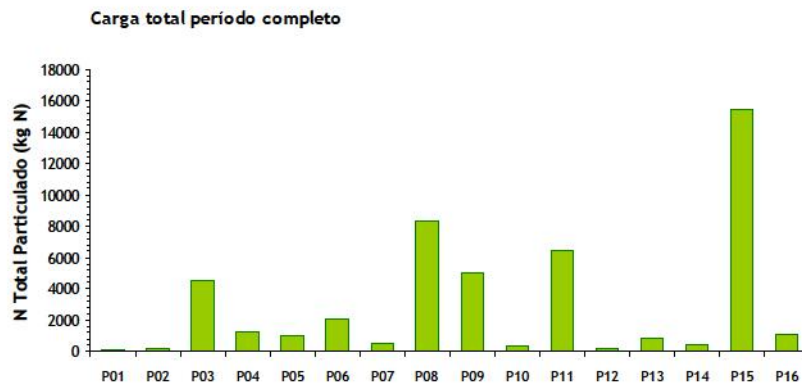
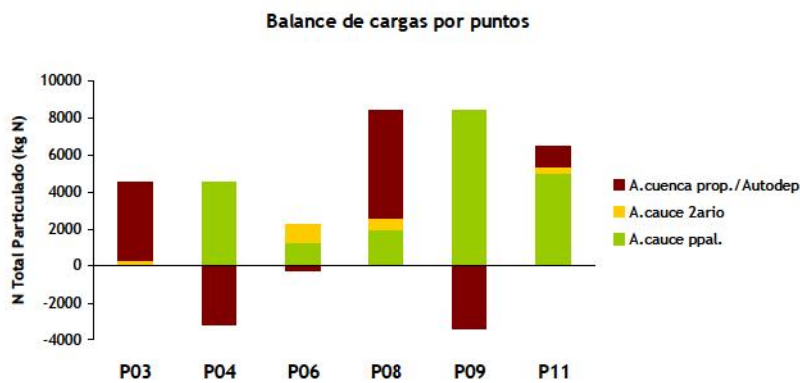


FIGURA 37. BALANCE DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se representa; en color verde, la carga del punto situado inmediatamente aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga de los puntos en cauces secundarios directamente implicados; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

La distribución estacional de las cargas de nitrógeno total particulado (figuras 38 y 39) continúa con la tendencia de aumentar conforme transcurren los periodos definidos.

FIGURA 38. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO

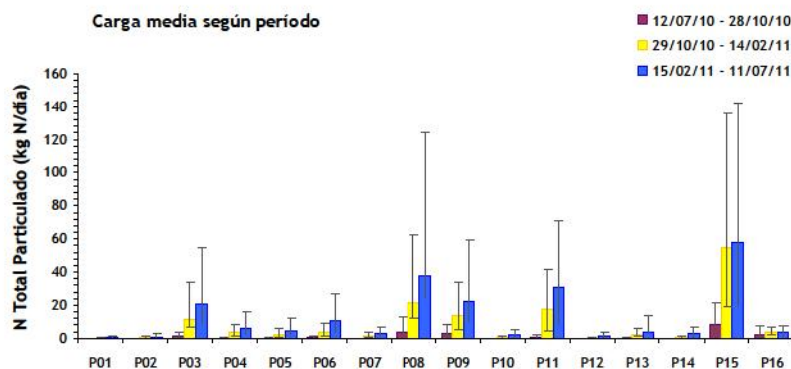
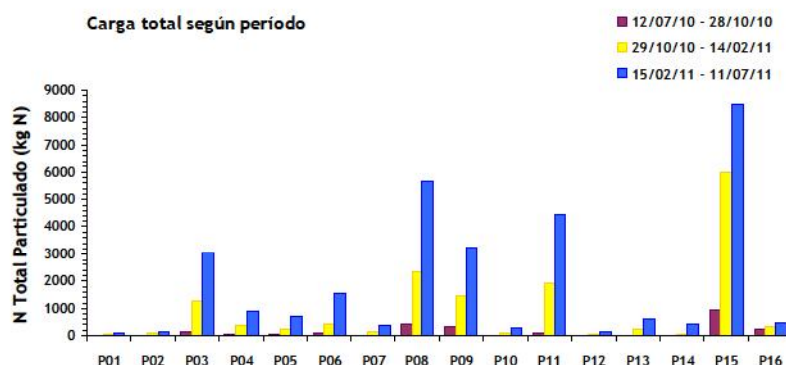


FIGURA 39. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO



En cuanto al balance de cargas de nitrógeno total particulado en el embalse (Tabla 10), Pinilla se presenta como un claro exportador, tanto en el período completo, como a lo largo de los tres subperíodos.

TABLA 10. BALANCE DE CARGAS DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg N)
Periodo completo	8.986	15.396	6.410
12/07/10 – 28/10/10	366	924	559
29/10/10 – 14/02/11	2.537	5.994	3.457
15/02/11 – 11/07/11	6.086	8.477	2.392

La distribución de los aportes de nitrógeno total particulado al embalse (Figura 40), vuelve a mostrar el punto 11 como la principal entrada (72%), frente al 12 por ciento de la EDAR. Sin embargo, la situación durante el primer subperíodo (Figura 41) sitúa a la EDAR (69 % de las aportaciones) por delante del Lozoya (27%).

FIGURA 40. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

% Entradas - Nitrógeno Total Particulado

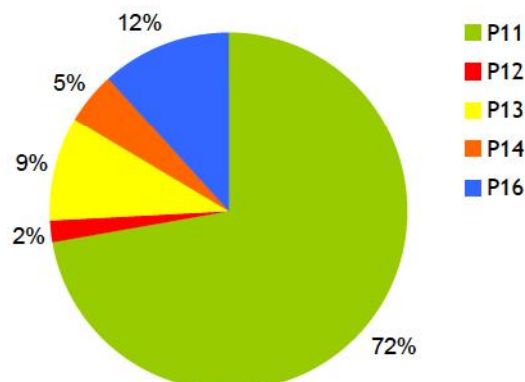
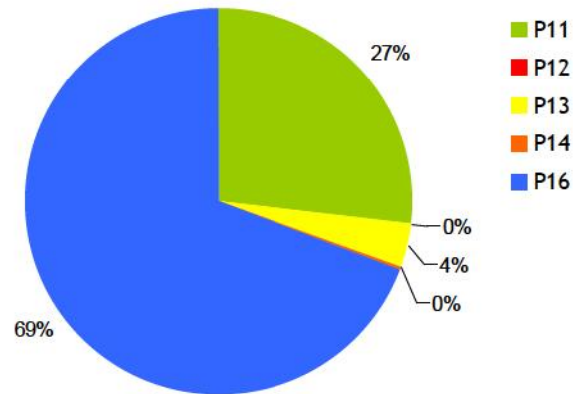


FIGURA 41. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA, PERÍODO 12/07/10 - 28/10/10

% Entradas - Nitrógeno Total Particulado
12/07/10 - 28/10/10



3.5.3.4. Carbono Total Particulado

En el carbono total particulado se repite el patrón de incrementos y descensos de carga (Figuras 42 y 43). Los puntos 3, 6, 8 y 11 son los que registran un aumento de cargas, mientras que los puntos 4 y 9 experimentan un descenso. Respecto a los aportes difusos, de nuevo parecen tener especial relevancia en los puntos 3, 8 y, bastante menor, en el punto 11 (Figura 44).

FIGURA 42. CARGAS MEDIAS DIARIAS DE CARBONO TOTAL PARTICULADO

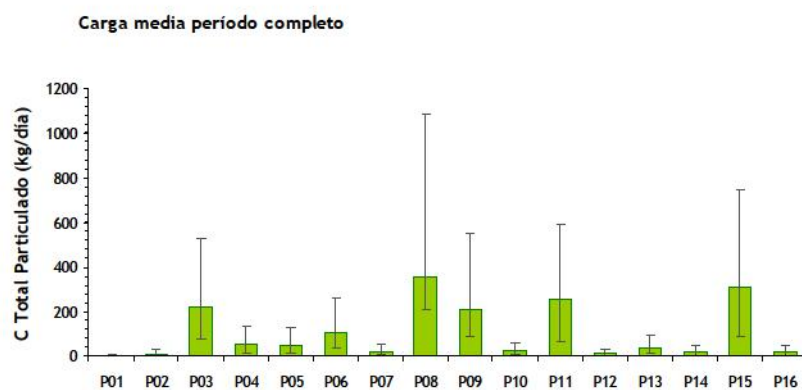


FIGURA 43. CARGAS TOTALES DE CARBONO TOTAL PARTICULADO

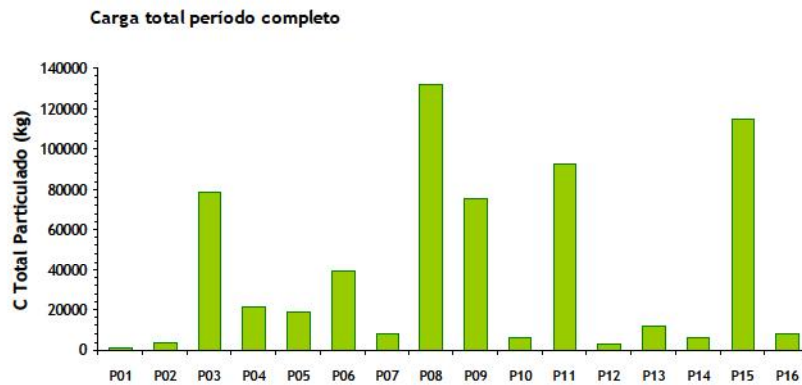
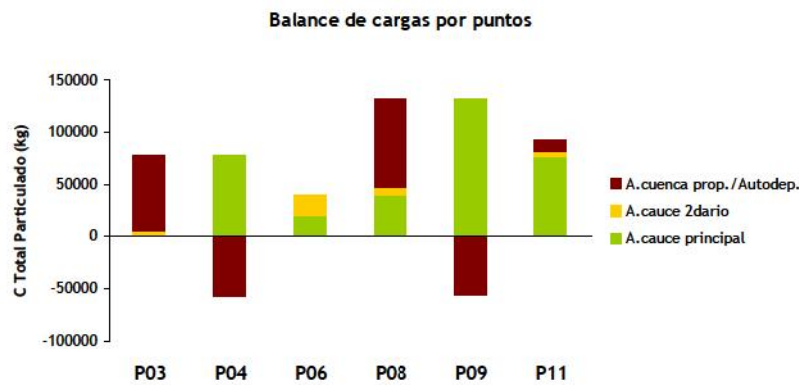


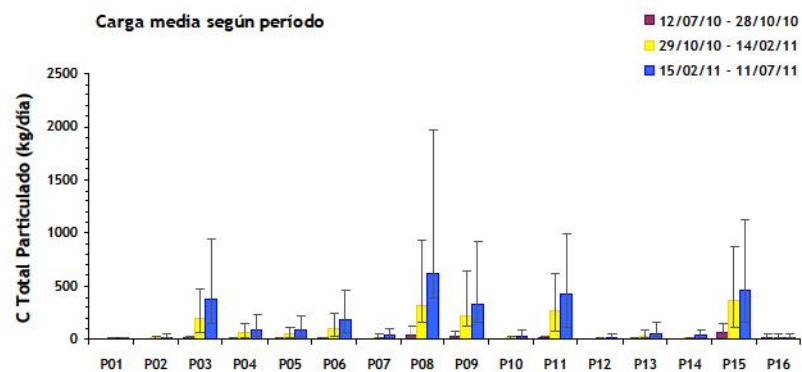
FIGURA 44. BALANCE DE CARBONO TOTAL PARTICULADO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se representa; en color verde, la carga del punto situado inmediatamente aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga de los puntos en cauces secundarios directamente implicados; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

La distribución estacional de las cargas de carbono total particulado (Figuras 45 y 46) mantiene la tendencia del incremento temporal.

FIGURA 45. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE CARBONO TOTAL PARTICULADO



Por su parte, el balance de cargas (Tabla 11) muestra que el embalse de Pinilla se comporta como un sumidero de carbono total particulado, debido a la fuerte retención de carbono durante el tercer período.

FIGURA 46. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA TOTAL DE CARBONO TOTAL PARTICULADO

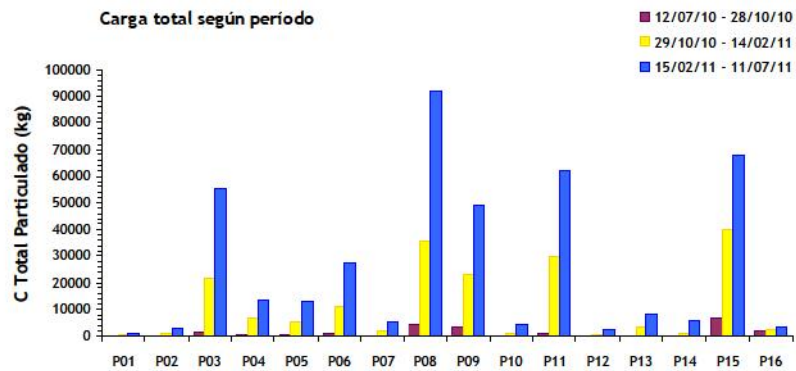


TABLA 11. BALANCE DE CARGAS DE CARBONO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg)
Periodo completo	121.596	114.628	-6.969
12/07/10 – 28/10/10	3.294	6.559	3.265
29/10/10 – 14/02/11	36.541	40.193	3.652
15/02/11 – 11/07/11	81.759	67.876	-13.883

La distribución de las entradas al embalse (Figura 47) vuelve a presentar el punto 11 como el principal responsable de los aportes de carbono orgánico particulado (77%), frente al 6 por ciento de la EDAR, que incluso es superado por el punto 13 (10%). La situación cambia durante el primer período (Figura 48), donde la EDAR es el principal aporte (56%) y el punto 11 el segundo (38%).

FIGURA 47. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE CARBONO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

% Entradas - Carbono Total Particulado

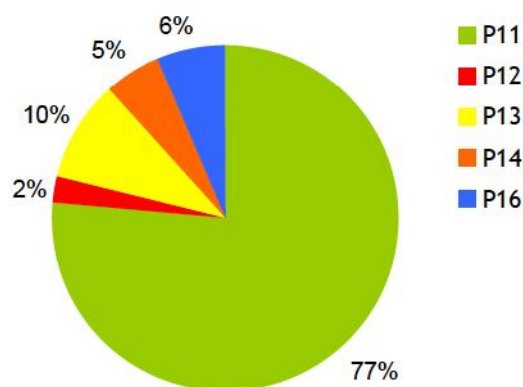
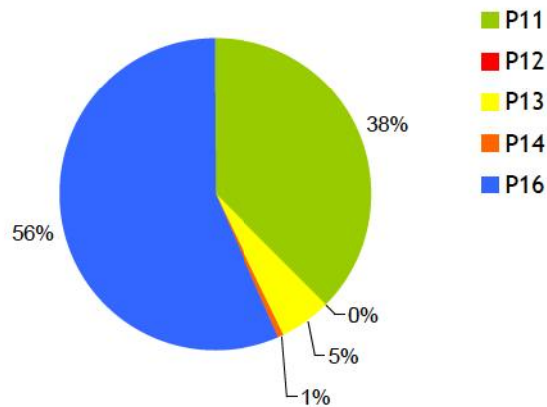


FIGURA 48. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE CARBONO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERÍODO 12/07/10 AL 28/10/10

% Entradas - Carbono Total Particulado
12/07/10 - 28/10/10



3.5.3.5. Carbono Orgánico Disuelto

El carbono orgánico disuelto rompe ligeramente con el patrón marcado por los anteriores compuestos, ya que además de en los puntos 3, 6, 8 y 11, también se registra un ligero aumento de carga en el punto 9 (Figuras 49 y 50). De esta manera, el punto 4 es la única estación del cauce principal que experimenta un descenso de la carga.

El aumento de carga en el punto 11 parece explicarse, casi por completo, a través del aporte del punto 10. Por su parte, los puntos 3 y 8 de nuevo parecen presentar aportes significativos propios de la cuenca (Figura 51).

FIGURA 49. CARGA MEDIA DIARIA DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO

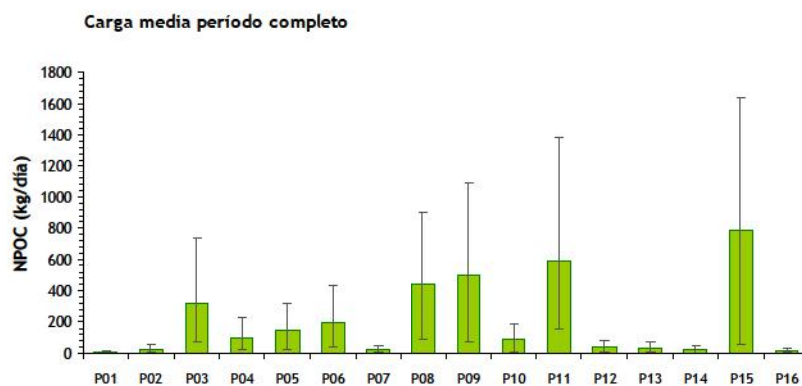


FIGURA 50. CARGAS TOTALES DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO

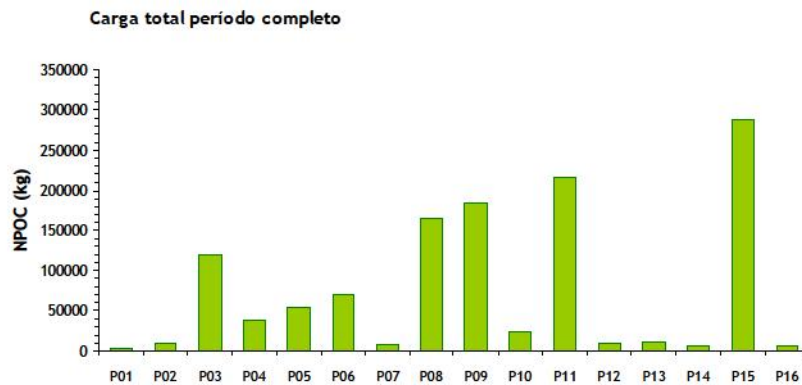
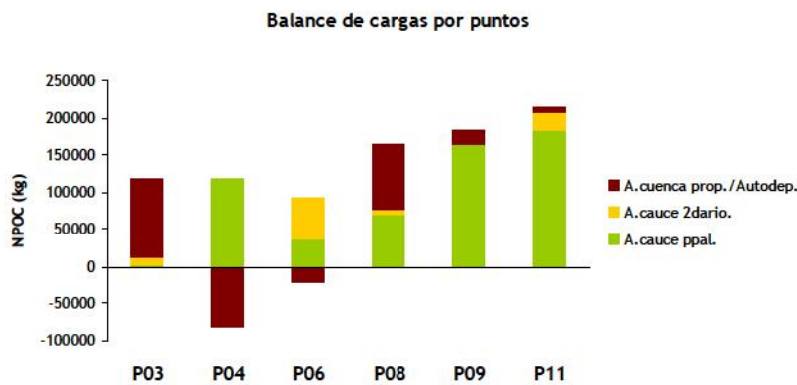


FIGURA 51. BALANCE DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se representa; en color verde, la carga del punto situado inmediatamente aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga de los puntos en cauces secundarios directamente implicados; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

En la distribución estacional (Figuras 52 y 53), el incremento temporal en las cargas de carbono orgánico disuelto, aunque existe, ya no es tan pronunciado entre el segundo y el tercer período.

FIGURA 52. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO

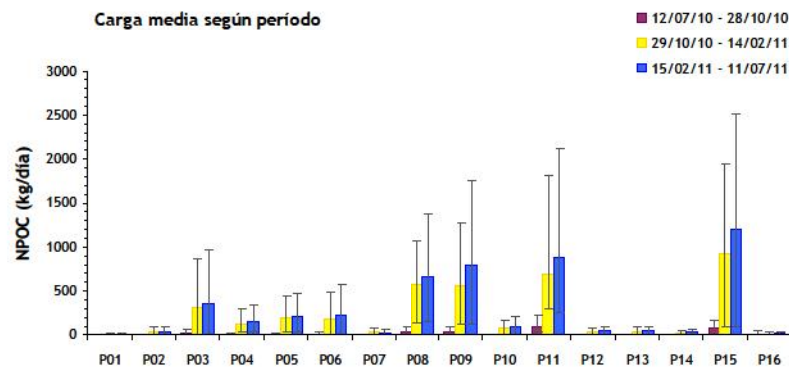
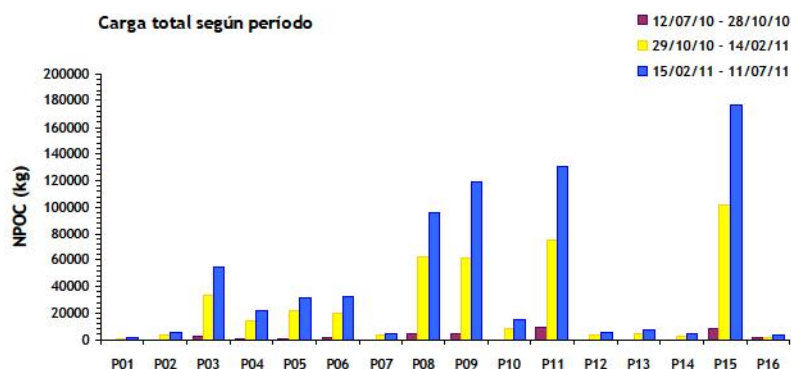


FIGURA 53. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO



El balance de cargas en el embalse (Tabla 12) sitúa al embalse de Pinilla como un claro exportador de carbono orgánico disuelto; situación que se invierte durante el primero de los tres periodos considerados.

TABLA 12. BALANCE DE CARGAS DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg)
Periodo completo	250.397	286.682	36.285
12/07/10 – 28/10/10	11.472	8.444	-3.028
29/10/10 – 14/02/11	87.188	101.370	14.182
15/02/11 – 11/07/11	151.688	176.841	25.153

Respecto a la distribución de entradas (Figura 54), el punto 11 domina los aportes con un 85 por ciento, mientras que la EDAR sólo aporta un 3 por ciento. Durante el primer período (Figura 55) el porcentaje de la EDAR aumenta hasta el 15 por ciento, mientras el punto 11 se sitúa en el 82 por ciento.

FIGURA 54. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN EL EMBALSE DE PINILLA. PERÍODO DE ESTUDIO

% Entradas - Carbono Orgánico Disuelto

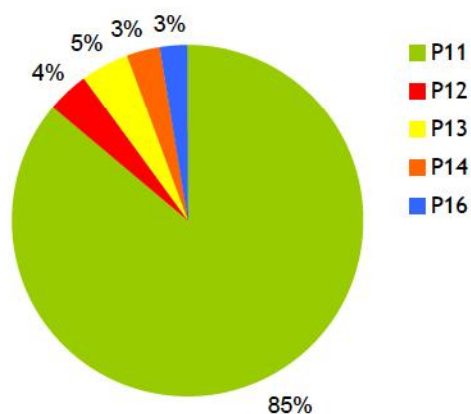
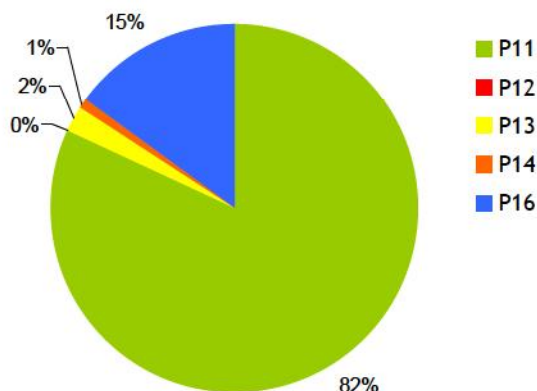


FIGURA 55. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN EL EMBALSE DE PINILLA. PERÍODO (12/07/10 - 28/10/10)

% Entradas - Carbono Orgánico Disuelto
12/07/10 - 28/10/10



3.5.3.6. Nitrito

En el caso del nitrito, en la mayoría de los puntos, LOADEST no dispuso de suficientes resultados para poder realizar los cálculos de cargas, debido a que en el conjunto de los casos la concentración se situaba por debajo del límite de detección. Este cálculo sólo pudo hacerse en la salida del embalse (Punto 15) y la EDAR (Punto 16). Así, en la tabla 13, se presenta el balance de cargas considerando la EDAR como la única entrada significativa de nitrito en el embalse. De esta manera, el embalse de Pinilla se comporta como un exportador de nitrito durante todo el año.

TABLA 13. BALANCE DE CARGAS DE NITRITO EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg)
Periodo completo	69	803	734
12/07/10 – 28/10/10	8	27	20
29/10/10 – 14/02/11	23	276	253
15/02/11 – 11/07/11	37	501	465

3.5.3.7. Amonio

En la representación de las cargas de amonio (Figuras 56 y 57) destaca especialmente el elevado valor del punto 15. En la cuenca, al igual que sucedía con en el DOC, desaparece la autodepuración en el punto 9, y los aportes propios de la cuenca vuelven a ser relevantes para el punto 11. (Figura 58).

FIGURA 56. CARGA MEDIA DIARIA DE AMONIO

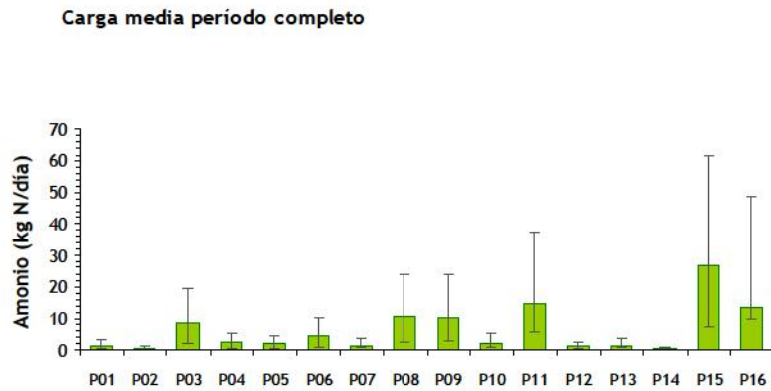


FIGURA 57. CARGAS TOTALES DE AMONIO

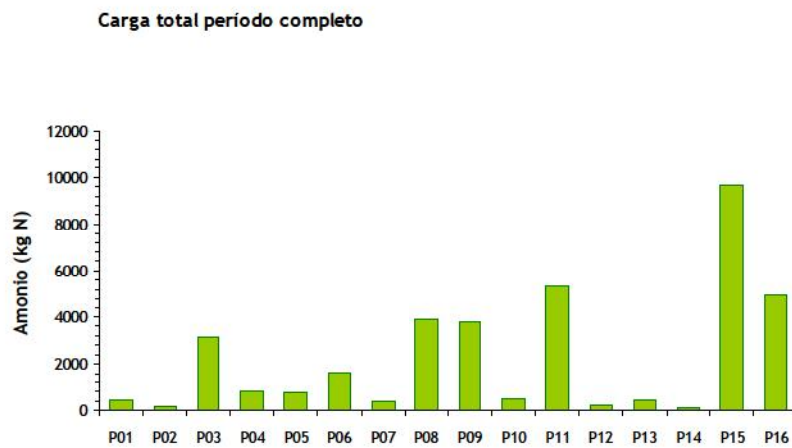
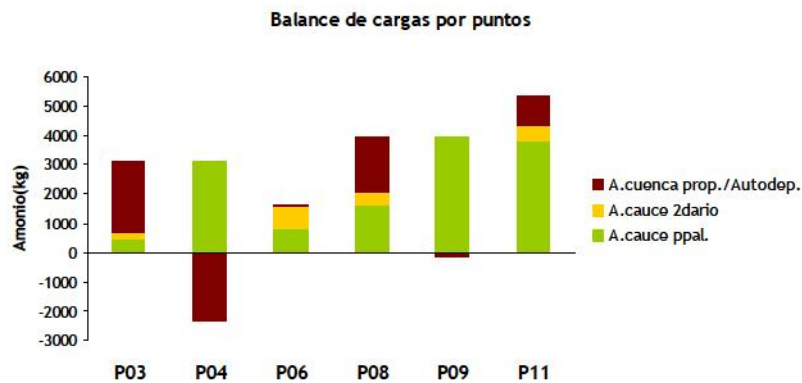


FIGURA 58. BALANCE DE AMONIO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se representa; en color verde, la carga del punto situado inmediatamente aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga de los puntos en cauces secundarios directamente implicados; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

La distribución temporal de las cargas de amonio (Figuras 59 y 60) está muy marcada por el elevado valor del punto 15, durante el tercer período. Todos los puntos experimentan un incremento temporal, a excepción de la EDAR, donde el patrón es más bien el inverso.

FIGURA 59. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE AMONIO

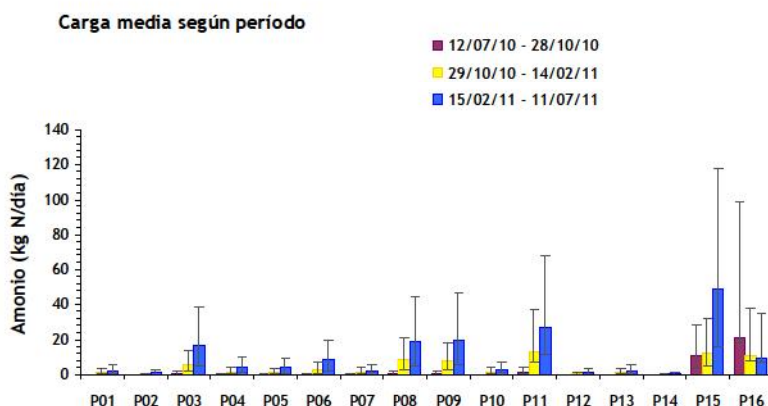
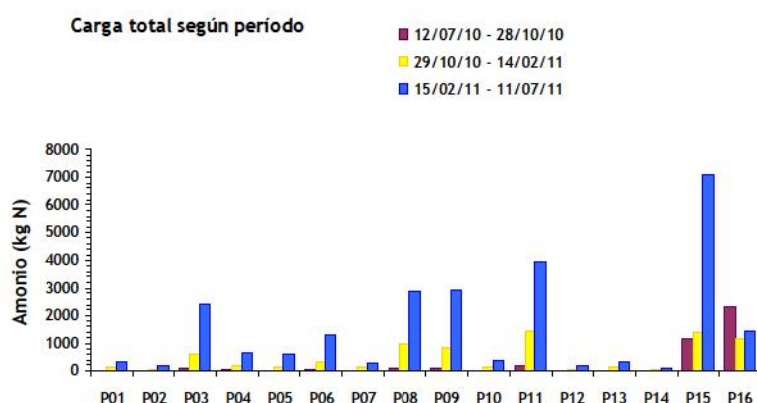


FIGURA 60. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE AMONIO



El balance global de cargas de amonio en el embalse de Pinilla (Tabla 14), a pesar del comportamiento exportador durante el tercer subperíodo, está marcado por el efecto sumidero del primero y el segundo.

TABLA 14. BALANCE DE CARGAS DE AMONIO EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg)
Periodo completo	11.060	9.643	-1.417
12/07/10 – 28/10/10	2.503	1.175	-1.328
29/10/10 – 14/02/11	2.804	1.368	-1.436
15/02/11 – 11/07/11	5.902	7.102	1.200

La distribución de las entradas a lo largo de todo el período (Figura 61) da como resultado un aporte casi equitativo entre el punto 11 y la EDAR (49 y 44 por ciento, respectivamente). Esta situación se invierte durante el último período (Figura 62) donde la EDAR pasa a explicar el 93 por ciento de los aportes de amonio.

FIGURA 61. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE AMONIO EN EL EMBALSE DE PINILLA, DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

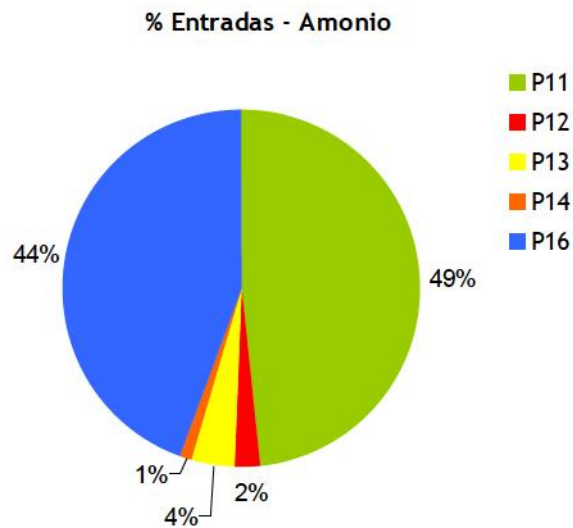
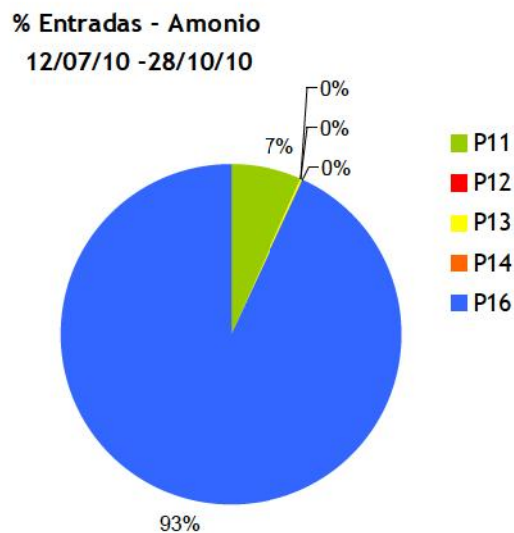


FIGURA 62. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE AMONIO EN EL EMBALSE DE PINILLA, DURANTE EL PERÍODO 12/07/10 AL 28/10/10



3.5.3.8. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Las cargas de DQO (Figura 63 y 64) ofrecen un resultado similar a las del Carbono Total Particulado, ya que es el punto 8 el que registra los valores más elevados, incluso por encima de los de la salida del embalse (punto 15). Tanto en el punto 8, como en el 3, destaca el fuerte incremento por aportes propios de la cuenca. Por otro lado, en los puntos 4 y 9 se continúa apreciando un descenso significativo de la carga por autodepuración (Figura 65).

FIGURA 63. CARGAS MEDIAS DE DQO

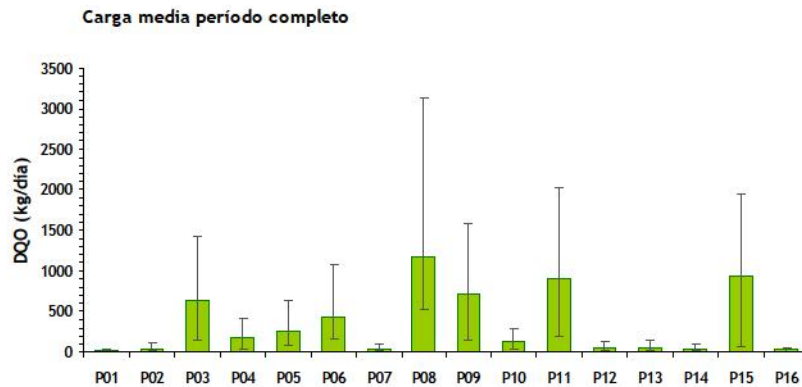


FIGURA 64. CARGAS TOTALES DE DQO

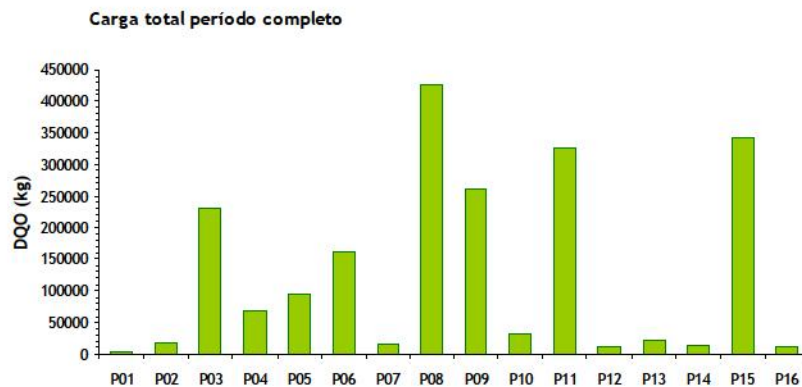
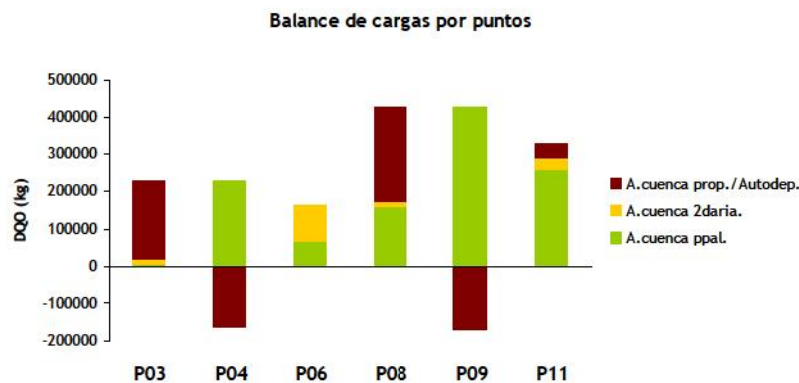


FIGURA 65. BALANCE DE DQO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se representa; en color verde, la carga del punto situado inmediatamente aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga de los puntos en cauces secundarios directamente implicados; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

En la representación de la distribución temporal (Figura 66 y 67) de nuevo la tendencia es un progresivo aumento temporal.

FIGURA 66. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS MEDIAS DE DQO

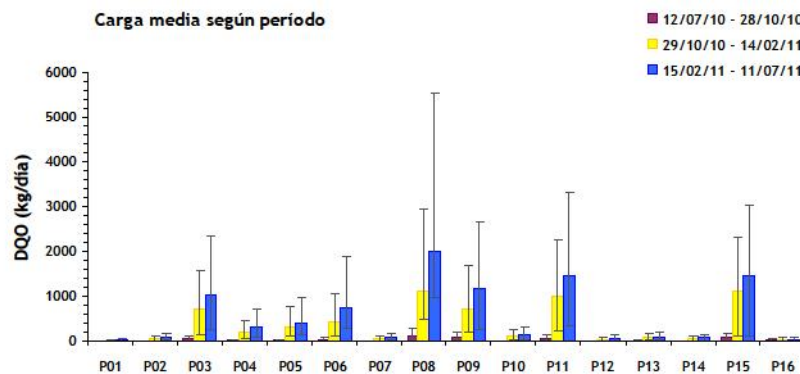
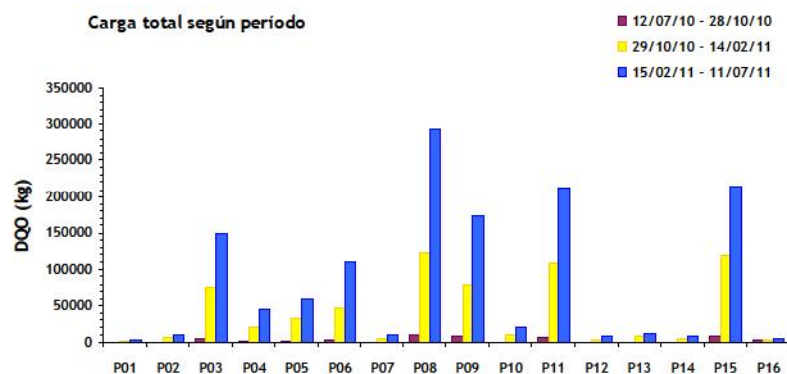


FIGURA 67. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE DQO



El balance de cargas (Tabla 15) coloca a Pinilla como un claro sumidero de DQO a lo largo de todo el período y, especialmente, durante el tercero.

TABLA 15. BALANCE DE CARGAS DE DQO EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg)
Periodo completo	385.137	342.005	-43.132
12/07/10 – 28/10/10	10.182	9.343	-838
29/10/10 – 14/02/11	127.589	119.355	-8.234
15/02/11 – 11/07/11	247.255	213.444	-33.811

La distribución de las entradas (Figura 68) muestra que el punto 11 es el principal responsable de los aportes (85%), frente al 3 por ciento de la EDAR. Durante el primer período (Figura 69) el porcentaje de la EDAR sube hasta el 27 por ciento, mientras que el punto 11 se queda en un 67 por ciento.

FIGURA 68. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE DQO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

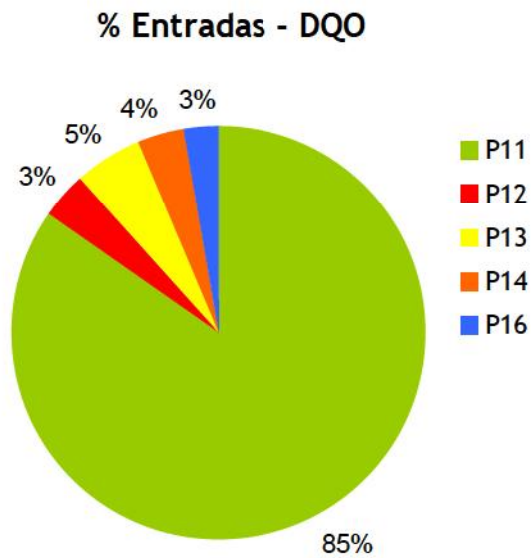
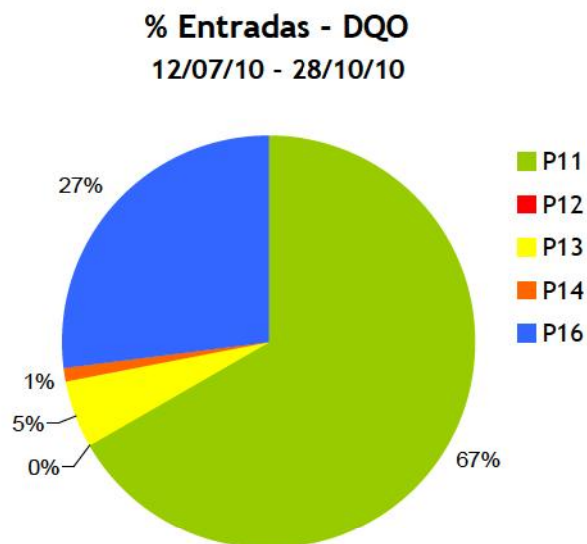


FIGURA 69. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE DQO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERÍODO 12/07/10 AL 28/10/10



3.5.3.9. Nitrato

La representación de las cargas de nitrato (Figuras 70 y 71) está marcado por las oscilaciones, con tendencia a incrementar a lo largo de la cuenca, así como el máximo valor alcanzado en la salida del embalse. Los aportes propios de la cuenca son relevantes, tanto para el punto 3 como para el 8, mientras que el descenso por autodepuración es especialmente marcado en el punto 4 (Figura 72).

FIGURA 70. CARGA MEDIA DIARIA DE NITRATO

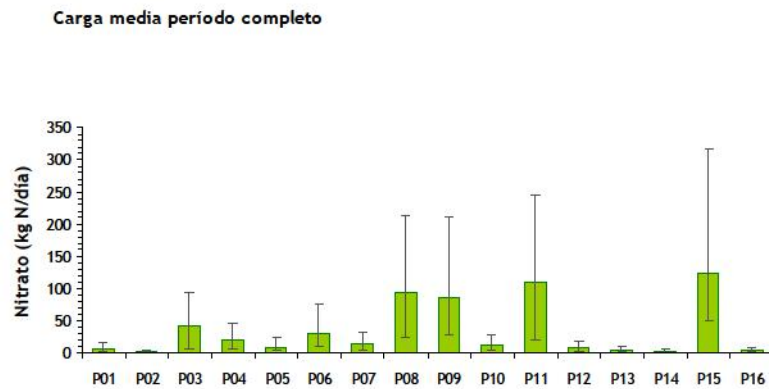


FIGURA 71. CARGAS TOTALES DE NITRATO

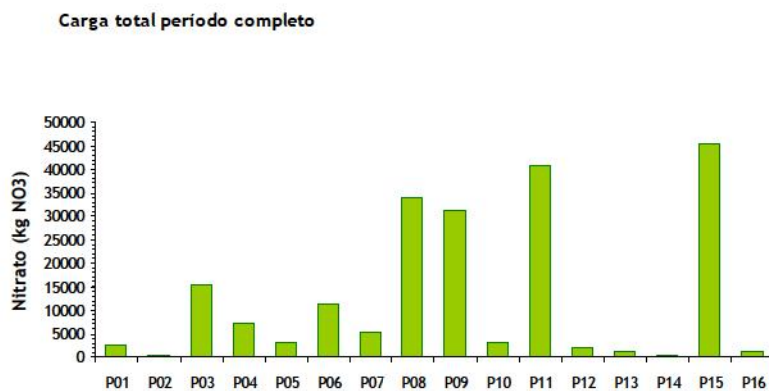
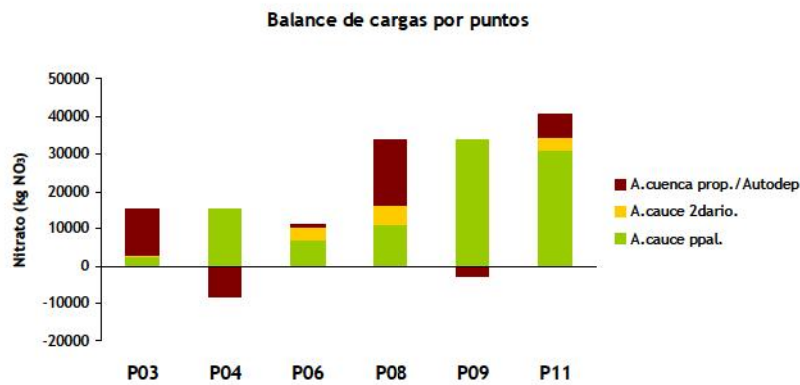


FIGURA 72. BALANCE DE NITRATO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se representa; en color verde, la carga del punto situado inmediatamente aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga de los puntos en cauces secundarios directamente implicados; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

En la distribución estacional (Figura 73 y 74) se repite el patrón del progresivo aumento temporal, ligeramente marcado para la mayoría de los puntos; salvo en el punto 15, donde la carga de nitrato durante el tercer período es mucho mayor que en el resto.

FIGURA 73. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE NITRATO

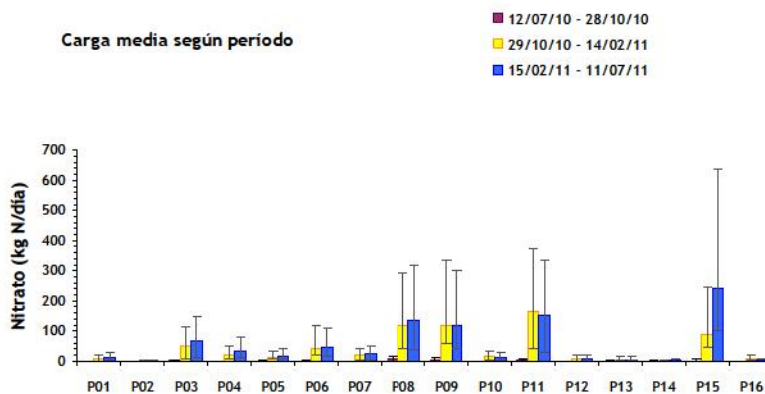
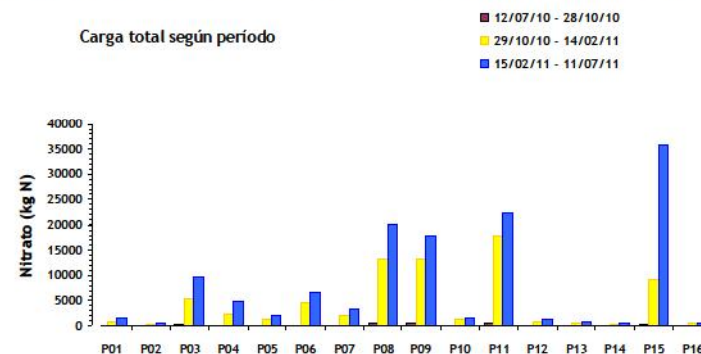


FIGURA 74. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE NITRATO



El balance de cargas (Tabla 16) presenta al embalse como un sumidero de nitrato, a pesar del marcado carácter exportador durante el tercer período.

TABLA 16. BALANCE DE CARGAS DE NITRATO EN EL EMBALSE DE PINILLA

	<i>Entradas</i>	<i>Salidas</i>	<i>Diferencia (Kg)</i>
Periodo completo	45.631	45.282	-349
12/07/10 – 28/10/10	549	186	-363
29/10/10 – 14/02/11	19.968	9.243	-10.725
15/02/11 – 11/07/11	25.115	35.852	10.737

Las entradas de nitrato en el embalse (Figura 75) muestran un reparto dominado, a lo largo de todo el año, por el punto 11 (89%). Durante el primer período la EDAR (punto 16) pasa a aportar el 12 por ciento de las entradas de nitrato (Figura 76).

FIGURA 75. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE NITRATO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

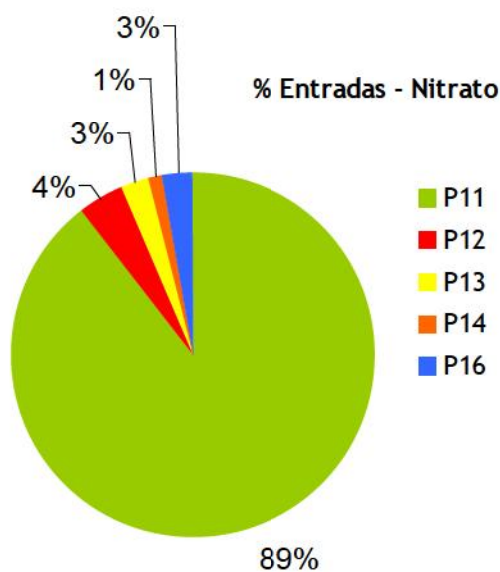
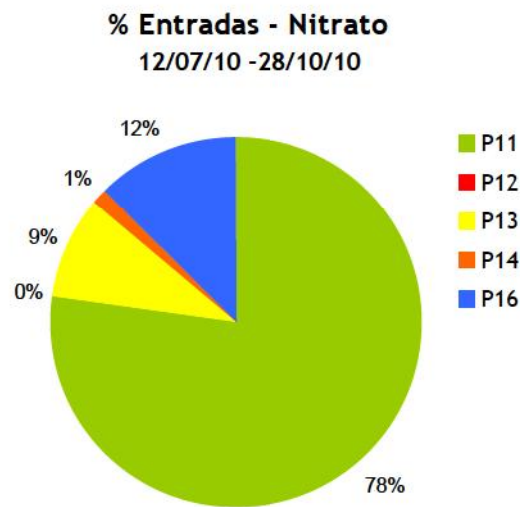


FIGURA 76. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE NITRATO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERÍODO (12/07/10 - 28/10/10)



3.5.3.10. Fosfato

En el caso del ortofosfato se destaca que el punto 4, situado en el cauce principal, presenta valores bajos en comparación con el punto 3, inmediatamente anterior, que muestra un importante incremento en la carga de fosfato (Figuras 77 y 78). Este hecho hace presumir que el azud situado entre el punto 3 y el punto 4 puede tener un papel principal en los procesos de autodepuración observados entre estos dos puntos (Figura 79).

FIGURA 77. CARGA MEDIA DIARIA DE FOSFATO

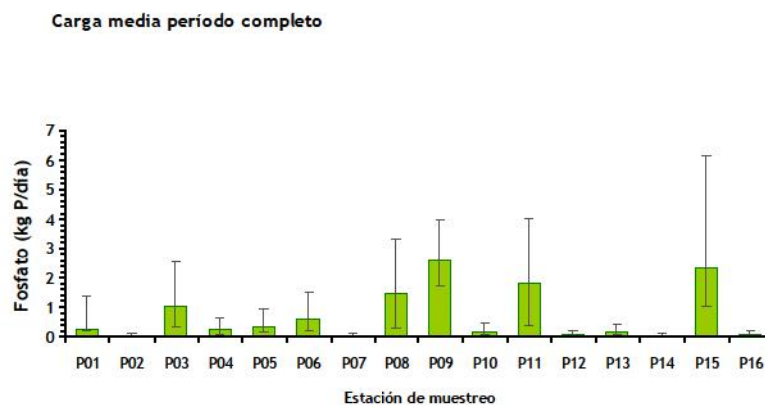


FIGURA 78. CARGAS TOTALES DE FOSFATO

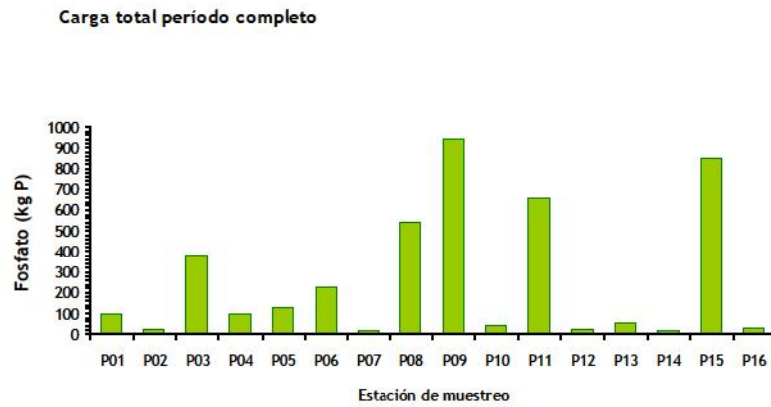
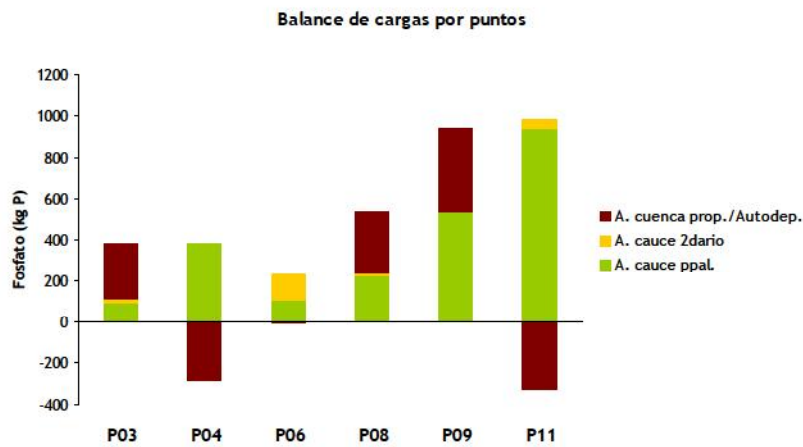


FIGURA 79. BALANCE DE FOSFATO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se representa; en color verde, la carga del punto situado inmediatamente aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga de los puntos en cauces secundarios directamente implicados; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

La distribución periódica (Figura 80 y 81) repite el patrón del incremento temporal.

FIGURA 80. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE FOSFATO

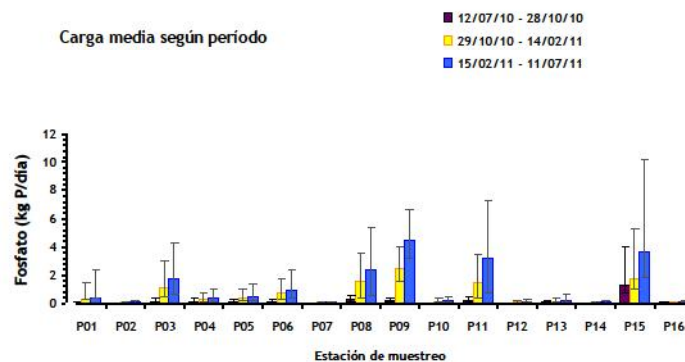
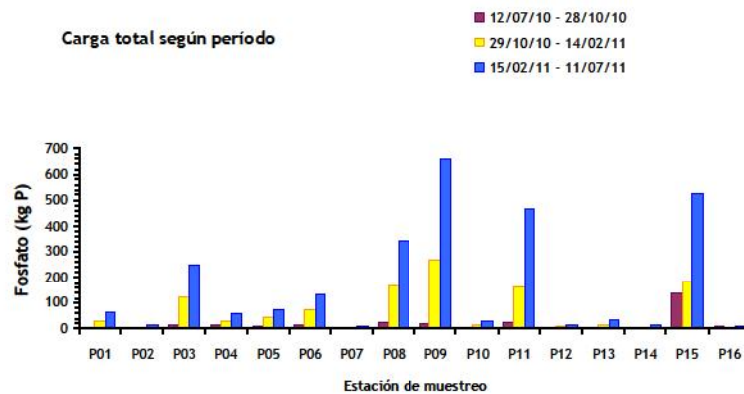


FIGURA 81. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE FOSFATO



El balance de cargas de fosfato en el embalse de Pinilla (Tabla 17) muestra que el comportamiento global como exportador está marcado por lo que sucede durante el primer período, en el que las entradas son muy escasas.

TABLA 17. BALANCE DE CARGAS DE FOSFATO EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg)
Periodo completo	772	850	78
12/07/10 – 28/10/10	40	138	98
29/10/10 – 14/02/11	192	183	-9
15/02/11 – 11/07/11	537	528	-9

La distribución de las entradas (Figura 82 y 83) presenta un claro dominio de las aportaciones desde el punto 11, tanto para el período completo (85%), como durante el primer período (62%). La aportación desde la EDAR se limita al 3 y el 25 por ciento, respectivamente; mientras que, para el global de las entradas, las aportaciones desde el punto 13 se sitúan por encima de la EDAR, con un 7 por ciento.

FIGURA 82. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE FOSFATO EN EL EMBALSE DE PINILLA, DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

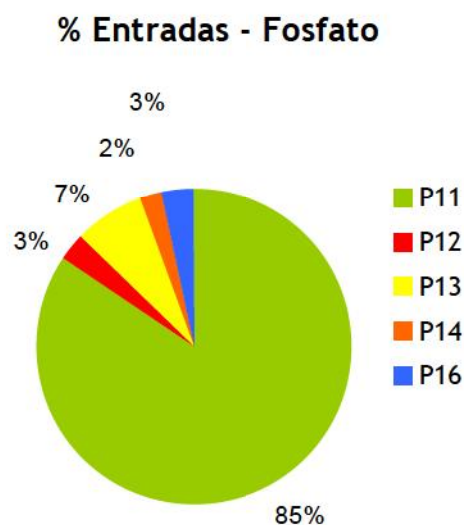
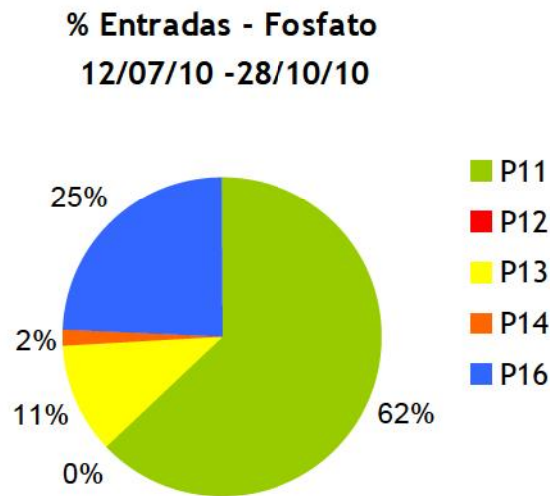


FIGURA 83. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE FOSFATO EN EL EMBALSE DE PINILLA, DURANTE EL PERÍODO 12/07/10 - 28/10/10



3.5.3.11. Hierro

Las cargas de hierro (Figuras 84 y 85) siguen un patrón similar al de los primeros compuestos, con incrementos en los puntos 3, 6, 8 y 11. Los importantes incrementos de las cuencas propias de los puntos 3 y 8 van seguidos por una fuerte autodepuración en los puntos 4 y 9 (Figura 86). El valor de la salida del embalse (Punto 15) continúa siendo el más alto calculado.

FIGURA 84. CARGA MEDIA DIARIA DE HIERRO

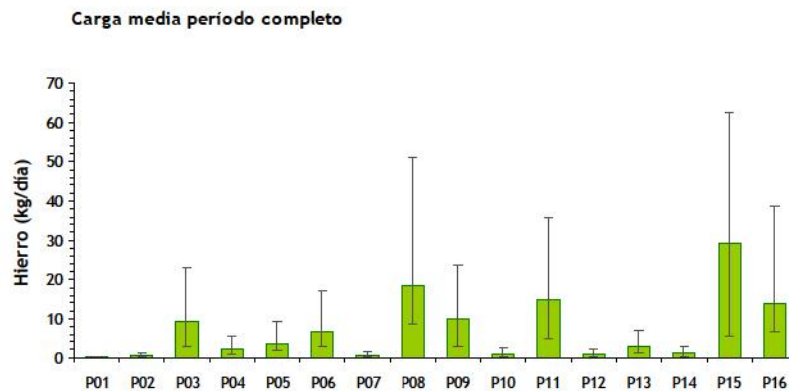


FIGURA 85. CARGAS TOTALES DE HIERRO

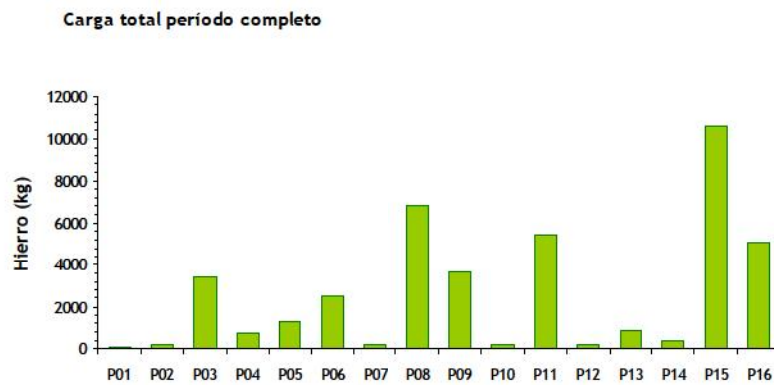
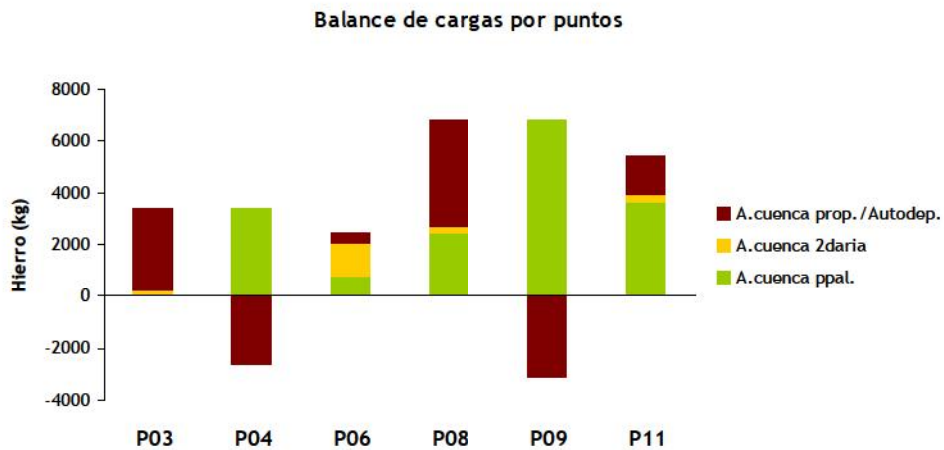


FIGURA 86. BALANCE DE HIERRO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se refleja; en color verde, la carga registrada en el punto situado aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga calculada para los puntos de cauces secundarios que le afectan; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

La distribución temporal (Figuras 87 y 88) repite, en líneas generales, el patrón del incremento progresivo (la excepción más marcada es la de la EDAR). En la cuenca, el punto 8 es el que registra las mayores cargas en cualquiera de los tres períodos.

FIGURA 87. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE HIERRO

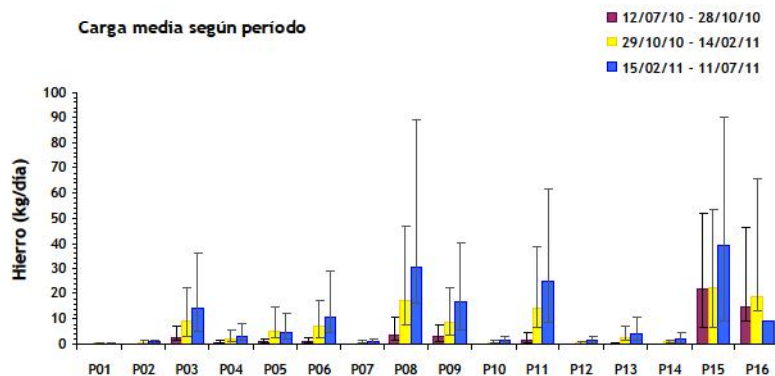
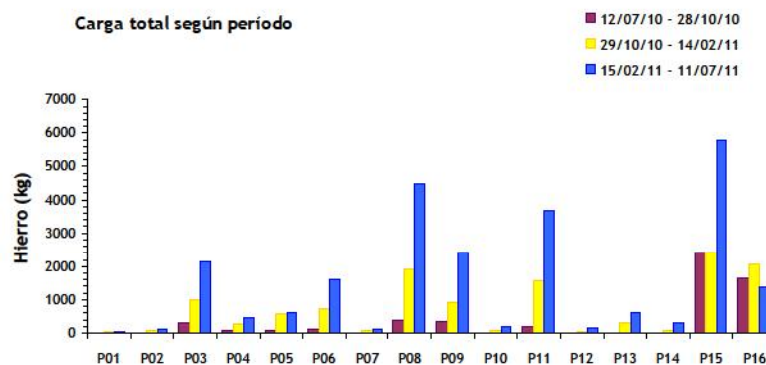


FIGURA 88. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE HIERRO



El balance de cargas (Tabla 18) da como resultado que el embalse de Pinilla se comportó en términos globales como un sumidero de hierro. Durante el primer período, sin embargo, exportó más hierro del que retuvo.

TABLA 18. BALANCE DE CARGAS DE HIERRO EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg)
Periodo completo	11.950	10.636	-1.314
12/07/10 – 28/10/10	1.861	2.394	533
29/10/10 – 14/02/11	4.031	2.439	-1.592
15/02/11 – 11/07/11	6.057	5.802	-255

Respecto al balance de entradas, la EDAR y el punto 11 realizan una aportación muy similar a lo largo del período completo (Figura 89), con un 42 y 46 por ciento, respectivamente. Durante el primer período (Figura 90) la situación se decanta con claridad hacia la EDAR, responsable del 88 por ciento de los aportes de hierro.

FIGURA 89. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE HIERRO EN EL EMBALSE DE PINILLA, DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

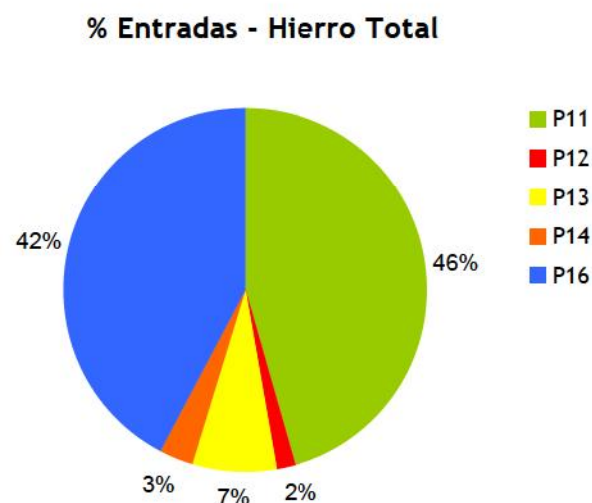
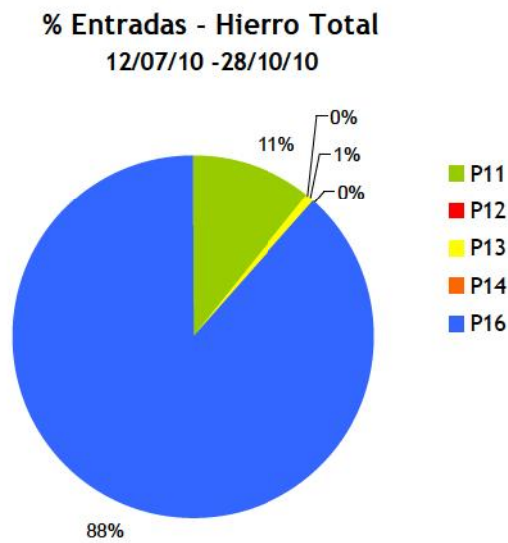


FIGURA 90. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE HIERRO EN EL EMBALSE DE PINILLA, DURANTE EL PERÍODO 12/07/10 - 28/10/10



3.5.3.12. Manganeso

En el caso del manganeso, destacan las bajas cargas registradas en la cuenca (Figuras 91 y 92). Los valores más altos, con diferencia, son los de la salida del embalse (Punto 15). En el balance por subcuencas (Figura 93) de nuevo aparecen los importantes aportes de la cuenca propia en los puntos 3 y 8, seguidos de una fuerte autodepuración en los puntos 4 y 9. Son también significativos los aportes de la cuenca propia en el punto 11, y las cargas del punto 5, que explicarían buena parte del aumento en el punto 6.

FIGURA 91. CARGA MEDIA DIARIA DE MANGANESO

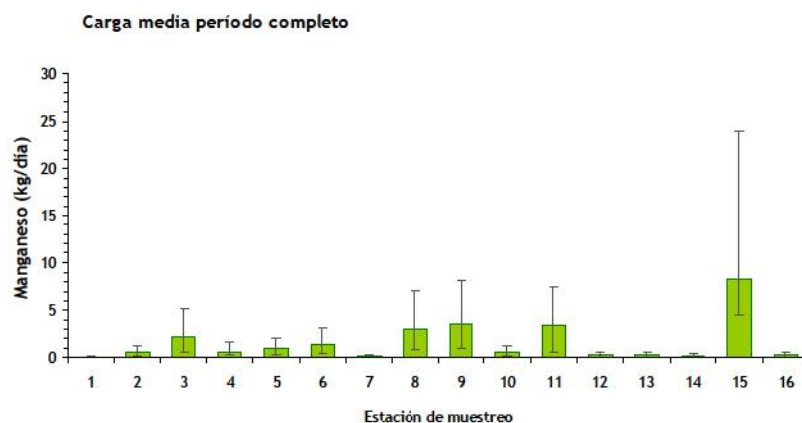


FIGURA 92. CARGAS TOTALES DE MANGANESO

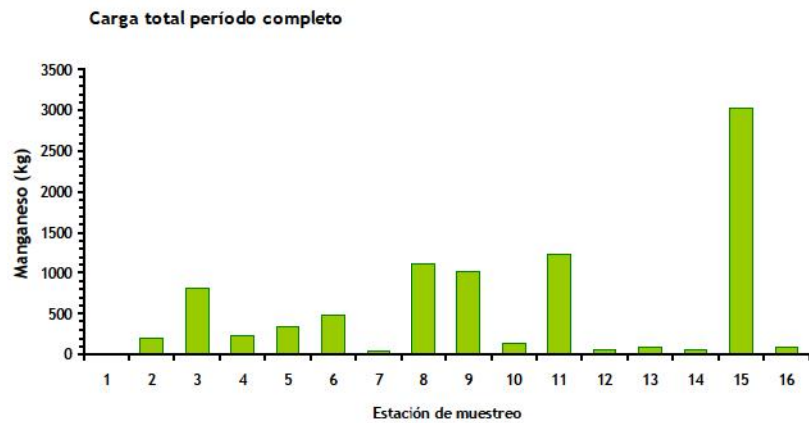
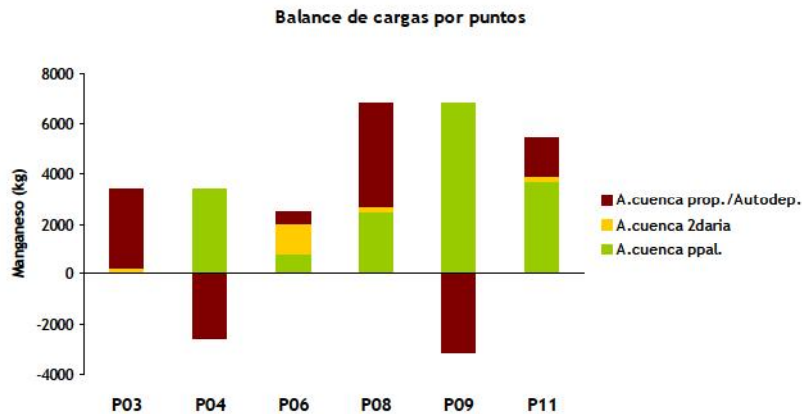


FIGURA 93. BALANCE DE MANGANESO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se refleja; en color verde, la carga registrada en el punto situado aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga calculada para los puntos de cauces secundarios que le afectan; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

La distribución estacional en la cuenca (Figuras 94 y 95) muestra un progresivo incremento temporal, con la excepción del punto 15, donde las cargas disminuyen entre el primer y el segundo período.

El balance de cargas de manganeso en el embalse de Pinilla (Tabla 19) da como resultado una exportación anual de 1516 kg, a pesar de que durante el segundo período el resultado es de pequeño sumidero (50 kg).

FIGURA 94. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DE MANGANESO

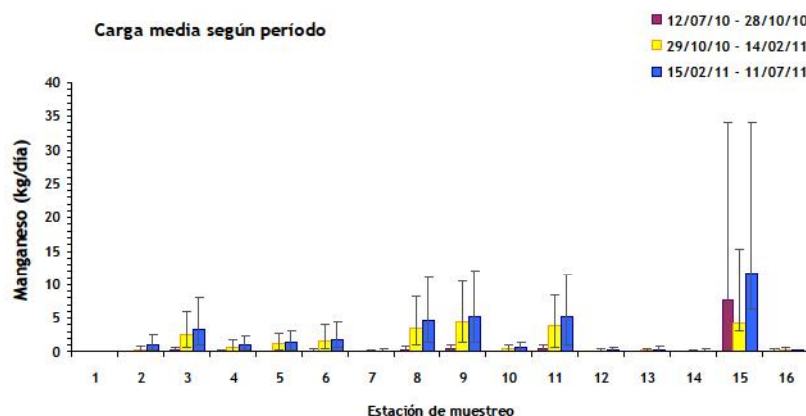


FIGURA 95. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE MANGANESO

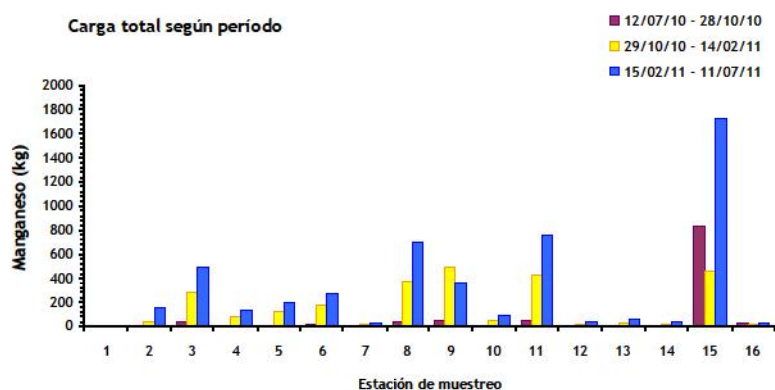


TABLA 19. BALANCE DE LAS CARGAS DE MANGANESO EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg)
Periodo completo	1.510	3.026	1.516
12/07/10 – 28/10/10	82	838	756
29/10/10 – 14/02/11	514	464	-50
15/02/11 – 11/07/11	908	1.723	815

En la distribución de las entradas de manganeso (Figuras 96 y 97) el dominio del punto 11 vuelve a ser claro, con un 82 por ciento del total. La EDAR tiene cierta importancia durante el primer periodo, con un 36 por ciento de las entradas.

FIGURA 96. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE MANGANESO EN EL EMBALSE DE PINILLA, DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

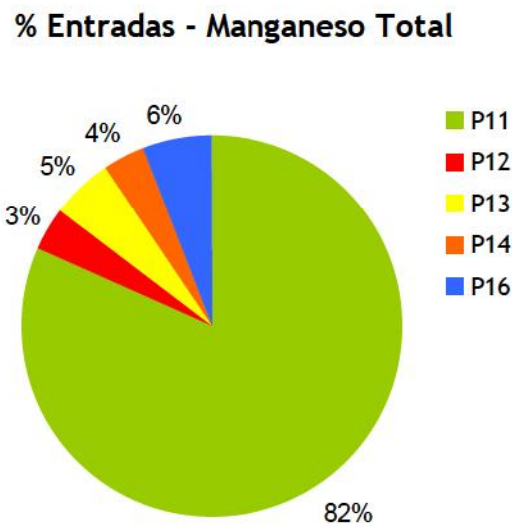
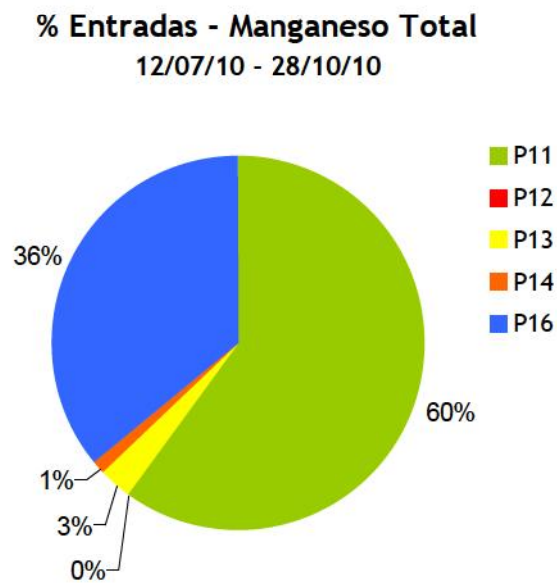


FIGURA 97. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE MANGANESO EN EL EMBALSE DE PINILLA, DURANTE EL PERÍODO 12/07/10 - 28/10/10



3.5.3.13. Cloruro

En las cargas de cloruros (Figura 98 y 99) destaca considerablemente el elevado valor del punto 3, superior a cualquiera del resto de puntos muestreados. Este resultado es debido, no solo al incremento de caudal que se produce en el punto 3 respecto al punto 1, sino principalmente, a las elevadas concentraciones de cloruros registradas durante el periodo 3, con un valor medio de 10,5 mg/l, más de tres veces superior a la de punto 1. Considerando los cloruros como un trazador de la afección antrópica de la calidad del agua, este resultado parece indicar que, especialmente durante el tercer periodo, el área sufriría una importante actividad humana que determinaría la calidad del agua. El incremento del punto 3, sin embargo, desciende rápidamente por la autodepuración registrada en el punto 4 (Figura 100). Los puntos 8 y 9 también registran un importante incremento por las cuencas propias, mientras que parte de esta carga se autodepura en el punto 11. Las fuertes cargas de cloruro sugieren un impacto significativo de efluentes de actividades humanas en las partes media y alta de la cuenca.

FIGURA 98. CARGA MEDIA DIARIA DE CLORURO

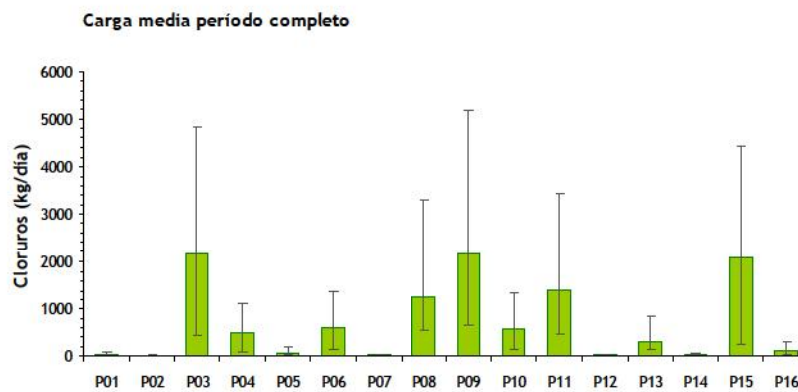


FIGURA 99. CARGAS TOTALES DE CLORURO

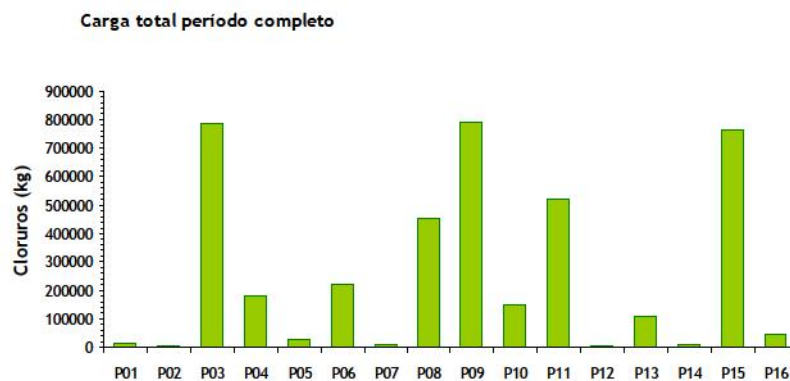
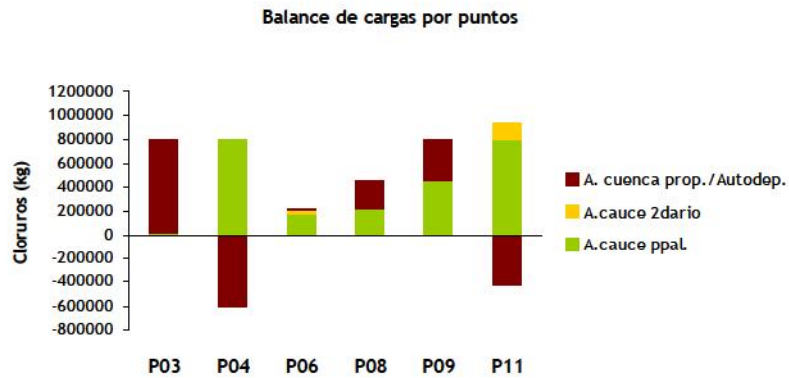


FIGURA 100. BALANCE DE CLORUROS A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se refleja; en color verde, la carga registrada en el punto situado aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga calculada para los puntos de cauces secundarios que le afectan; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

La distribución estacional de las cargas de cloruros (Figuras 101 y 102) no difiere de los patrones de incremento temporal anteriormente vistos, con un incremento especialmente destacable entre el primer y el segundo período.

FIGURA 101. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE CLORUROS

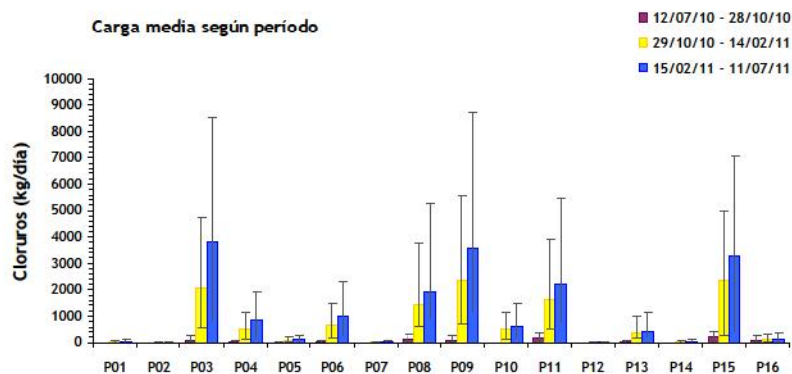
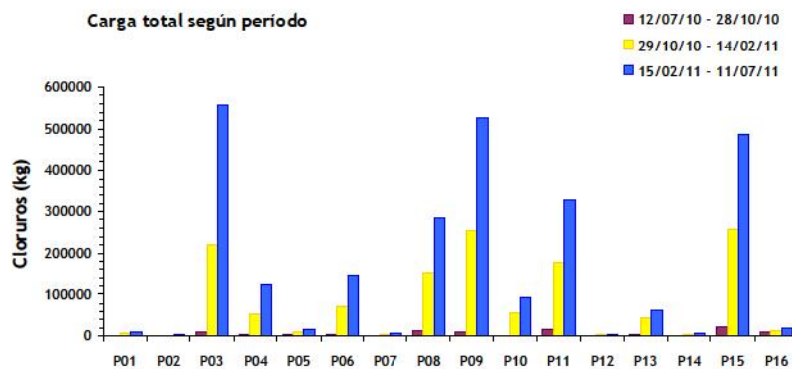


FIGURA 102. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE CLORUROS



En consonancia con la distribución estacional, el balance de cargas de cloruro en el embalse de Pinilla (Tabla 20) muestra que, durante el primer período este se comporta como un sumidero, mientras que durante el segundo y tercer período el comportamiento es exportador, lo que determina el balance global.

TABLA 20. BALANCE DE LAS CARGAS DE CLORURO EN EL EMBALSE DE PINILLA

	<i>Entradas</i>	<i>Salidas</i>	<i>Diferencia (Kg)</i>
Periodo completo	684.948	762.120	77.172
12/07/10 – 28/10/10	28.065	20.693	-7.372
29/10/10 – 14/02/11	238.566	256.150	17.584
15/02/11 – 11/07/11	418.268	485.247	66.979

En la distribución de entradas (Figuras 103 y 104) vuelve a dominar el punto 11, con un 76 por ciento del aporte total, y un 58 por ciento durante el primer período.

El punto 13 (arroyo Palomar) representa el 16 por ciento del total, mientras que la EDAR, aporta un 6 por ciento del total, y un 33 por ciento durante el primer período. Este resultado viene dado por las elevadas concentraciones de cloruros que presenta el punto 13 (la más elevada de toda la cuenca, con 23,1 mg/l de media), hecho que señala una fuerte influencia antrópica sobre la calidad del agua. Dado que la concentración parece tener una relación inversa con el caudal, se podría presumir que el cloruro tiene un origen urbano, aunque los datos no son concluyentes al respecto.

FIGURA 103. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE CLORURO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

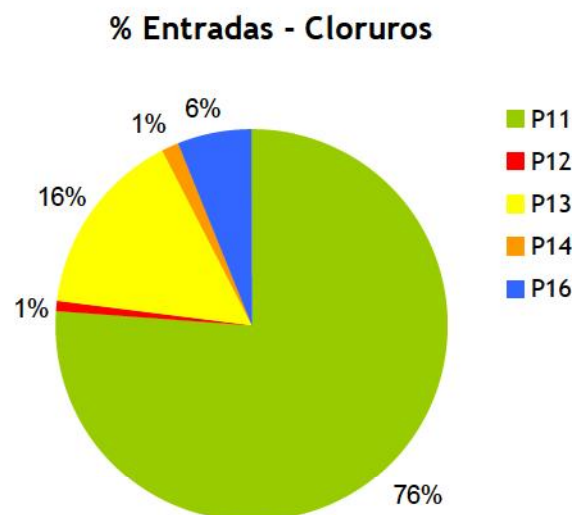
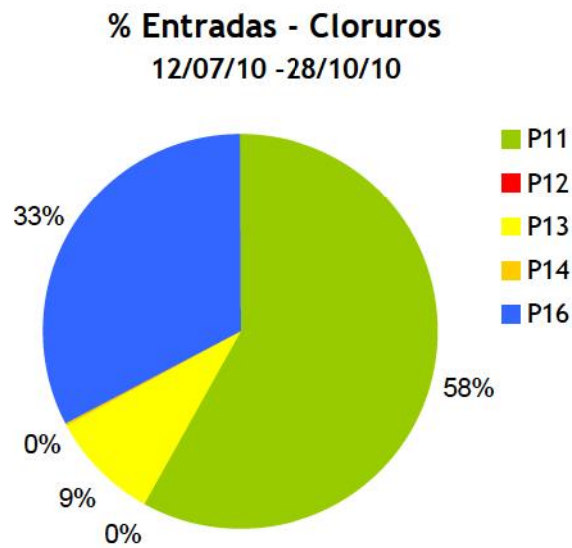


FIGURA 104. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE CLORURO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERÍODO 12/07/10 - 28/10/10



3.5.3.14. Sílice

Las cargas de sílice (Figura 105 y 106) muestran una tendencia al aumento aguas abajo. Sin embargo, la tendencia no es progresiva y, entre el punto 3 y el 4 el descenso es muy marcado. Los aportes en los puntos 5 y 10 en cauces secundarios contribuyen al incremento en los puntos 6 y 11 (Figura 107). El punto 8, al igual que el punto 3, registra un importante incremento de carga explicado por el aporte de las cuencas propias.

FIGURA 105. CARGA MEDIA DIARIA DE SÍLICE

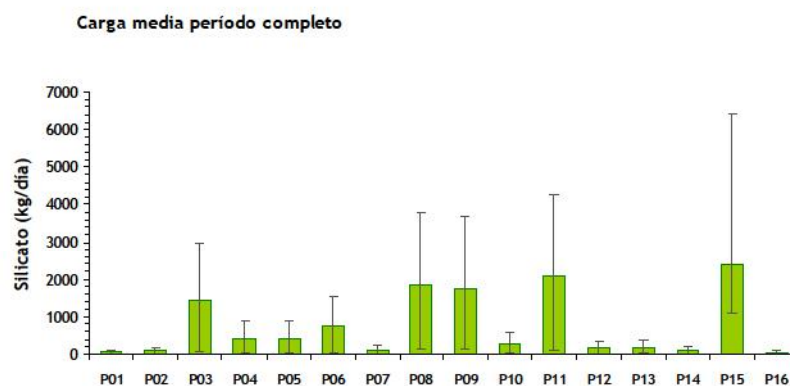


FIGURA 106. CARGAS TOTALES DE SÍLICE

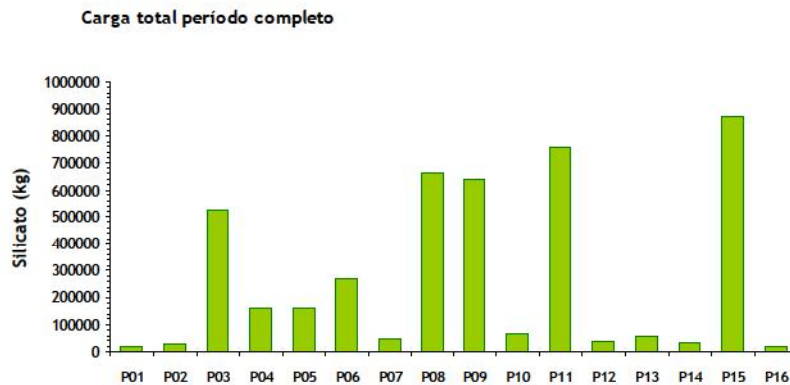
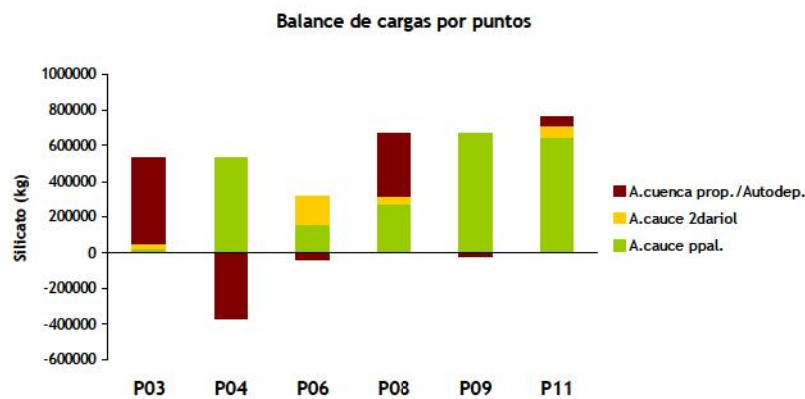


FIGURA 107. BALANCE DE SILICATO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL



Para cada una de las estaciones se refleja; en color verde, la carga registrada en el punto situado aguas arriba en el cauce principal; en color naranja, la carga calculada para los puntos de cauces secundarios que le afectan; en color granate, los aportes propios de la cuenca o pérdidas por autodepuración

La distribución temporal (Figuras 108 y 109) muestra el incremento temporal, especialmente destacado en el punto 15, entre el segundo y tercer período.

FIGURA 108. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE SÍLICE

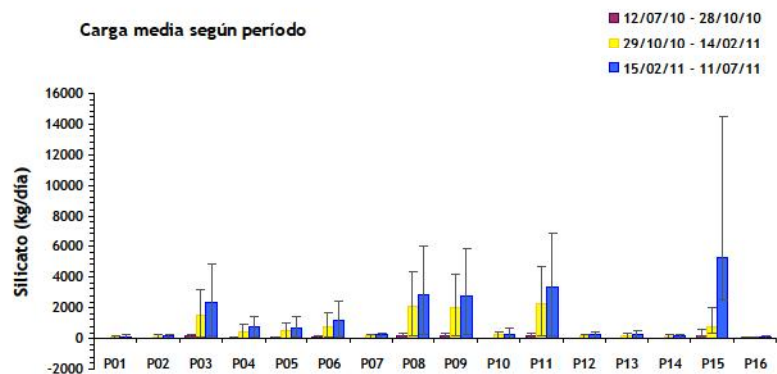
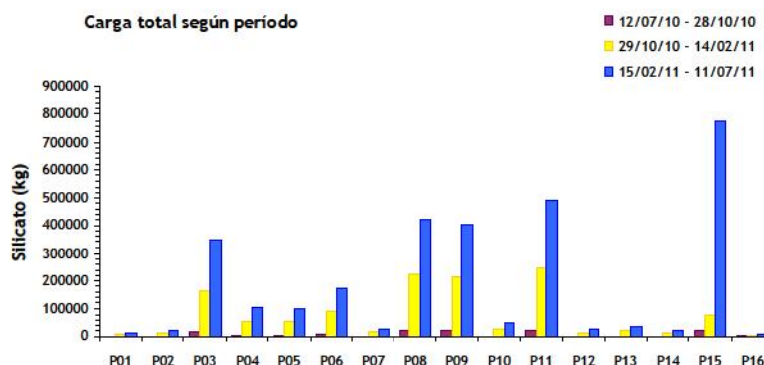


FIGURA 109. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE SÍLICE



En cuanto al balance de cargas en el embalse (Tabla 21), la fuerte exportación durante el tercer período no puede contrarrestar el comportamiento como sumidero durante los dos primeros períodos, que determinan el resultado global.

TABLA 21. BALANCE DE LAS CARGAS DE SÍLICE EN EL EMBALSE DE PINILLA

	Entradas	Salidas	Diferencia (Kg)
Periodo completo	901.737	870.890	-30.847
12/07/10 – 28/10/10	22.882	19.908	-2.974
29/10/10 – 14/02/11	296.390	77.281	-219.109
15/02/11 – 11/07/11	582.695	773.661	190.966

La distribución de las entradas de silicato (Figuras 110 y 111) repite el dominio de los aportes desde el punto 11 (84% del global, y 83% durante el primer período). La EDAR tiene una importancia relativa durante el primer período, con un 11 por ciento de los aportes; mientras que el punto 13 es el segundo aporte más importante, con un 6 por ciento de las entradas.

FIGURA 110. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE SÍLICE EN EL EMBALSE DE PINILLA, DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

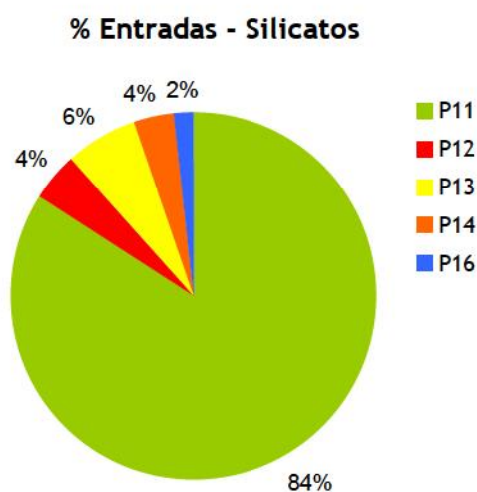
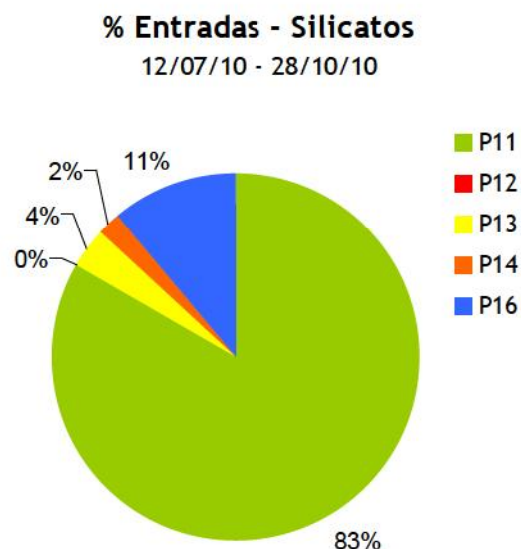


FIGURA 111. DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE SÍLICE EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERÍODO 12/07/10 AL 28/10/10



3.5.3.15. Resumen

Tras haber visto en detalle el balance de cargas para los 13 nutrientes y los 16 puntos de muestreo, se presenta a continuación una serie de tablas donde se resume el comportamiento observado en la cuenca del embalse de Pinilla, y se ofrece una primera interpretación de los principales foco de aportes de materiales potencialmente problemáticos para la evolución de la calidad del agua en el embalse de Pinilla.

En primer lugar, respecto a los puntos situados en el cauce principal, las tablas 22 y 23 presentan, por un lado, los puntos en los que se han observado procesos de autodepuración y, por otro, los puntos donde se han registrado de forma neta aportes de la cuenca propia.

TABLA 22. PUNTOS DE MUESTREO Y NUTRIENTES PARA LOS CUALES SE REGISTRARON, DE FORMA NETA, PROCESOS DE AUTODEPURACIÓN

Autodepuración de nutrientes		Puntos de muestreo			
		4	6	9	11
Fósforo Total	PT	X		X	
Nitrógeno Total	NT	X		X	
Nitrógeno Total Particulado	NTP	X	X	X	
Carbono Total Particulado	CTP	X		X	
Carbono Orgánico Disuelto	NPOC	X	X		
Nitrato	NH ₄	X		X	
Demanda Química Oxígeno	DQO	X		X	
Nitrato	NO ₃	X		X	
Fosfato	PO ₄	X		X	
Hierro	Fe	X		X	
Manganeso	Mn	X		X	
Cloruro	Cl	X			X
Sílice	Si	X	X	X	

TABLA 23. PUNTOS DE MUESTREO Y NUTRIENTES PARA LOS CUALES SE REGISTRARON, DE FORMA NETA, APORTES DE LA CUENCA PROPIA

Aportes de nutrientes de la cuenca propia		Puntos de muestreo				
		3	6	8	9	11
Fósforo Total	PT	X		X		X
Nitrógeno Total	NT	X	X	X		X
Nitrógeno Total Particulado	NTP	X		X		X
Carbono Total Particulado	CTP	X		X		X
Carbono Orgánico Disuelto	NPOC	X		X	X	X
Nitrito	NH ₄	X	X	X		X
Demanda Química Oxígeno	DQO	X		X		X
Nitrato	NO ₃	X	X	X		X
Fosfato	PO ₄	X	X	X		X
Hierro	Fe	X	X	X		X
Manganeso	Mn	X	X	X		X
Cloruro	Cl	X	X	X	X	
Sílice	Si	X		X		X

Tanto en el punto 3, como en el punto 8, se observaron aumentos de carga para todos los nutrientes, que se explican por aportes desde la cuenca propia. Estos aumentos suelen ir acompañados de un proceso de autodepuración, que queda patente en los puntos 4 y 9. No obstante, existen dos compuestos, el Carbono Orgánico Disuelto (NPOC) y los Cloruros (Cl), para los que la carga no sólo no disminuye en el punto 9, sino que aumenta por el efecto de la propia cuenca.

Por otro lado, tanto el punto 6, como el 11, acostumbran a registrar aumentos de carga debidos en gran parte a los aportes de los cauces secundarios (puntos 5 y 10). Además, otra parte del incremento puede estar explicada por los aportes de la cuenca propia. Esto, sin embargo, no es así para el caso del Nitrógeno Total Particulado (NTP), el NPOC, y el Silicato (Si) en el punto 6; ni para el Cloruro (Cl) en el punto 11; donde se observa un descenso por autodepuración.

Estos resultados apuntan a varias áreas relevantes en cuanto al aporte de materiales al embalse, y por otra parte señala tramos del río donde netamente se produce secuestro de materiales. La figura 112 resume esta idea, identificando las áreas aguas abajo de Valdesquí, el arroyo Umbría, y particularmente los núcleos de Rascafría y urbanizaciones asociadas, y el tramo inmediatamente anterior al embalse, como las más importantes respecto el aporte de nutrientes y materia orgánica al embalse. La autodepuración en el Punto 4 se debe, probablemente, a la presencia de un azud antes del área recreativa de La Isla que hace subir el tiempo de residencia del agua de forma importante, lo que facilita los procesos de autodepuración.

En cuanto a los balances de cargas en el embalse de Pinilla, la tabla 24 muestra para qué compuestos se comporta como fuente y para cuáles como un sumidero. Se comprueba que el embalse exporta manganeso y fosfato, sugiriendo la presencia de fenómenos de carga interna desde el sedimento. El embalse no exporta hierro, probablemente porque la depuradora aporta grandes cantidades de este metal. Por otra parte, la depuradora exporta DOC pero consume DQO, lo que sugiere que existen diferencias importantes en la degradabilidad de la materia orgánica que entra y sale del embalse.

Por último, en cuanto a la distribución de las entradas en el embalse, la tabla 25 presenta la aportación de los tres principales puntos a lo largo de todo el período de estudio, y durante el primero de los tres subperíodos establecidos (12/07/10 – 28/10/10). Como se puede comprobar, es la entrada del río Lozoya, en el punto 11, la que domina el global del período; mientras que la EDAR (Punto 16) adquiere especial relevancia para algunos compuestos (amonio y hierro) en el global del período y, especialmente, durante el primer subperíodo (PT, NT, NTP, CTP, NH₄, DQO, PO₄, Fe, Mn, Cl). El punto 13, por su parte, aparece como la segunda entrada más importante para buena parte de los nutrientes a lo largo del período completo.

FIGURA 112. ESQUEMA DE LAS PRINCIPALES ZONAS DE APORTACIÓN DE NUTRIENTES EN LA CUENCA DE PINILLA Y TRAMOS DONDE SE PRODUCE RETENCIÓN NETA DE MATERIALES

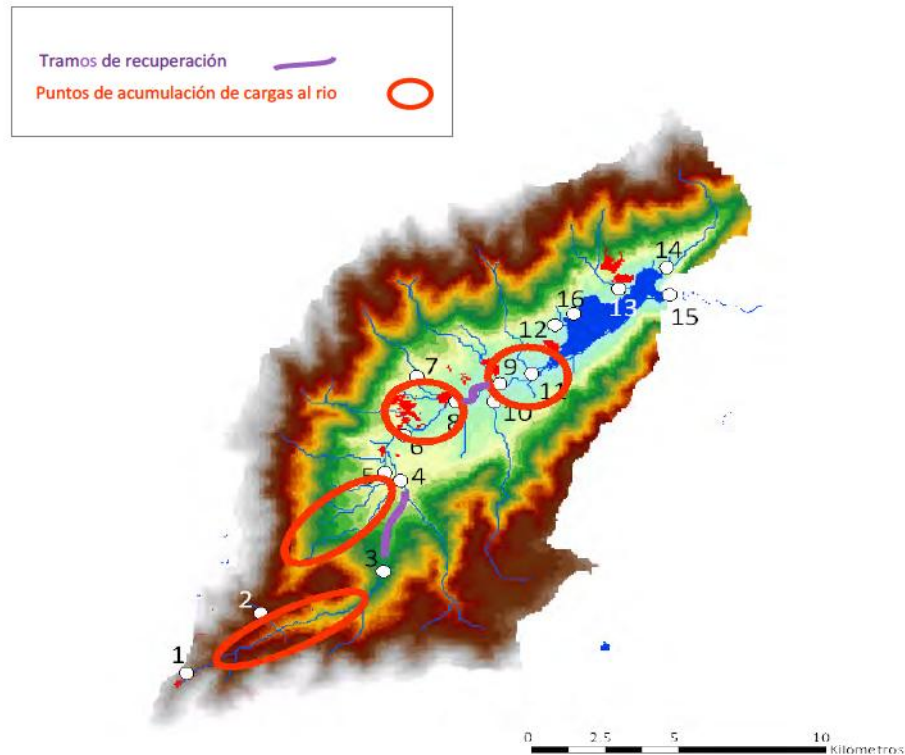


TABLA 24. COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE DE PINILLA RESPECTO A CADA UNO DE LOS NUTRIENTES ANALIZADOS

Nutrientes		Sumidero	Exportador
Fósforo Total	PT		X
Nitrógeno Total	NT	X	
Nitrógeno Total Particulado	NTP		X
Carbono Total Particulado	CTP	X	
Carbono Orgánico Disuelto	NPOC		X
Nitrato	NH ₄	X	
Demanda Química Oxígeno	DQO	X	
Nitrato	NO ₃	X	
Fosfato	PO ₄		X
Hierro	Fe	X	
Manganeso	Mn		X
Cloruro	Cl		X
Sílice	Si	X	

TABLA 25. PORCENTAJE DE LAS APORTACIONES AL EMBALSE DE PINILLA PARA LAS TRES PRINCIPALES ENTRADAS (PUNTOS 11, 13 Y 16)

Aportes de nutrientes de la cuenca propia		Puntos muestreo					
		11		13		16	
		Periodo completo	Periodo 12/7/10 a 28/10/10	Periodo completo	Periodo 12/7/10 a 28/10/10	Periodo completo	Periodo 12/7/10 a 28/10/10
Fósforo Total	PT	69	24	6	7	21	69
Nitrógeno Total	NT	83	28	3	3	9	69
Nitrógeno Total Particulado	NTP	72	27	9	4	12	69
Carbono Total Particulado	CTP	77	38	10	5	6	56
Carbono Orgánico Disuelto	NPOC	85	82	5	2	3	15
Nitrito	NH ₄	49	7	4	0	44	93
Demanda Química Oxígeno	DQO	85	67	5	5	3	27
Nitrato	NO ₃	89	78	3	9	3	12
Fosfato	PO ₄	88	62	7	12	3	24
Hierro	Fe	46	11	7	1	42	88
Manganeso	Mn	82	60	5	3	6	36
Cloruro	Cl	76	58	16	9	6	33
Sílice	Si	84	83	6	4	2	11

Se presentan los valores para el período completo y el primer período 12/7/10 al 28/10/10.

En resaltado aparecen los valores del principal contribuidor para cada nutriente y período considerado

3.6. ANÁLISIS ESPECTROSCÓPICO DE LA MATERIA ORGÁNICA DISUELTA

En este apartado se realiza una aproximación a la composición de la materia orgánica disuelta en cada una de las estaciones de muestreo de la cuenca de Pinilla. Para ello se han explorado las propiedades espectroscópicas de la materia orgánica disuelta mediante la construcción de matrices de excitación-emisión (EEM) y posterior análisis PARAFAC (Parallel Factor Analysis).

La capacidad de la materia orgánica de emitir fluorescencia cuando es excitada por haces de luz a diferentes longitudes de onda es bien conocida por los químicos analíticos, pero sólo recientemente estas propiedades han sido utilizadas para caracterizar propiedades de la materia orgánica con interés para los ecosistemas acuáticos continentales. Se trata, por lo tanto, de una metodología en constante desarrollo y que producirá substanciales innovaciones en los próximos años.

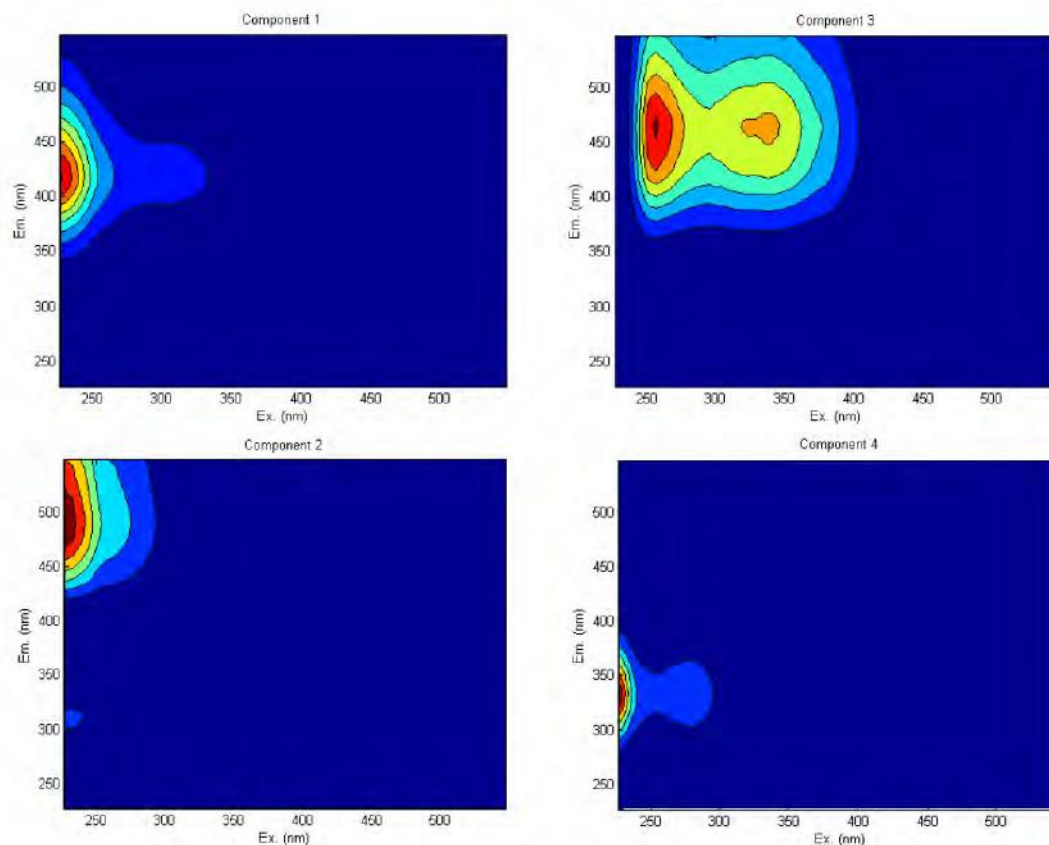
En este estudio se ha analizado la señal espectroscópica de todas las muestras recogidas en todas las estaciones incluidas en este estudio. Las EEM entre 200 y 600 nm de las muestras filtradas se han obtenido mediante un espectrofotómetro de fluorescencia HITACHI F-7000. Se estableció un ancho de banda de 5 nm, tanto para la excitación como para la emisión, escaneando a incrementos de 3 nm, a una velocidad de 12.000 nm min⁻¹ y a una potencia de 700 V. Las EEM fueron corregidas (Stedmon & Bro. 2008) y convertidas a Raman Units (RU), utilizando el área bajo el pico de dispersión de Raman de una muestra de agua Milli-Q a la excitación de 350 nm. La dispersión de Raman de las muestras fue eliminada sustrayendo una EEM de agua Milli-Q, mientras que los efectos de dispersión de Rayleigh se eliminaron, con un método de interpolación 3D (Kowalczyk et al. 2005).

Las EEM fueron reducidas a componentes discretos, a través del análisis PARAFAC, siguiendo los procedimientos recomendados por Stedmon & Bro. (2008), empleando el paquete DOMFLUOR en MATLAB (Mathworks, Inc.). El análisis PARAFAC puede considerarse una versión 3D del análisis de componentes principales, y básicamente extrae los componentes principales de las EEM, de forma que se obtienen componentes que tienen la forma de una EEM. La combinación lineal de los componentes extraídos de esta forma nos puede dar como resultado cualquiera de las EEM medidas en nuestras muestras, lo que nos permite trazar en qué puntos y momentos abundan determinados componentes. Obviamente, ello sólo tiene interés si se puede relacionar los componentes con tipologías de materia orgánica que puedan impactar de forma diferente a los ecosistemas acuáticos.

3.6.1. Modelo PARAFAC para la cuenca de Pinilla

El modelo PARAFAC para la cuenca de Pinilla se construyó utilizando todas las muestras disponibles, implicando que se analizaron conjuntamente un total de 392 matrices EEM (lo que supone aproximadamente 65 horas de tiempo de espectrofluorímetro, sin contar el procesamiento de las muestras). El análisis PARAFAC de estas 392 matrices validó un modelo que identificó 4 componentes, que se pueden consultar en la figura 113.

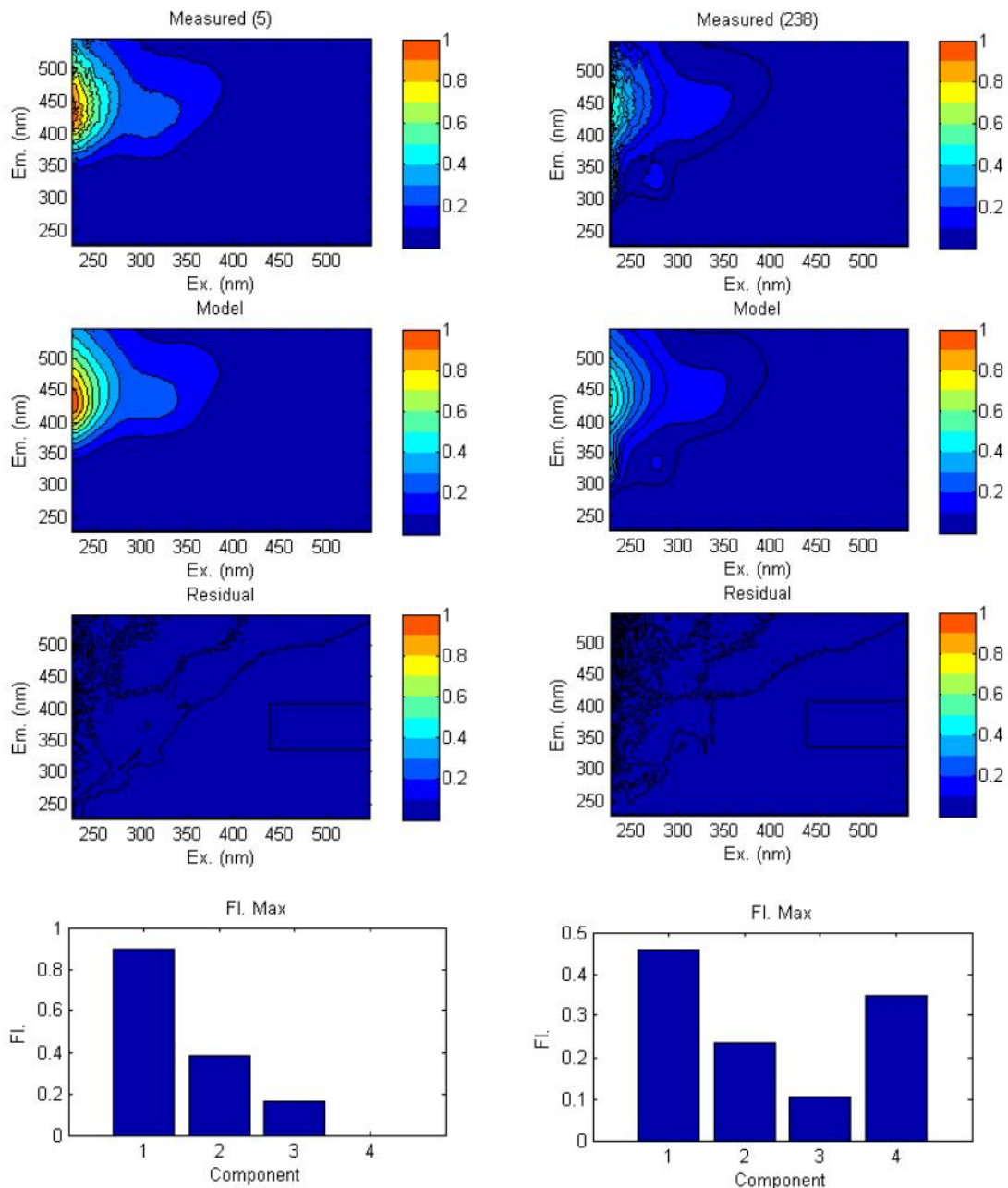
FIGURA 113. MATRICES EEM OBTENIDOS MEDIANTE ANÁLISIS PARAFAC, SOBRE LAS 392 MATRICES MEDIDAS EN MUESTRAS PROCEDENTES DE LA CUENCA DE PINILLA



1 (superior izquierda), 2 (inferior izquierda), 3 (superior derecha) y 4 (inferior derecha)

A modo ilustrativo, la figura 114 ejemplifica cómo funciona el método PARAFAC. En ella vemos dos EEM, de dos muestras diferentes de la cuenca de Pinilla (que corresponden a una muestra de un punto de cabecera y otro de la entrada del embalse). El modelo PARAFAC intenta simular las dos EEM medidas en las muestras con una combinación lineal diferente de los cuatro componentes (que de hecho son a su vez matrices EEM) identificados en la figura 113. Se puede apreciar que los resultados son muy satisfactorios, y que los residuos de la comparación entre las EEM medidas y las simuladas mediante PARAFAC son muy pequeños.

FIGURA 114. EJEMPLO DE MODELACIÓN DE DOS EEM MEDIDAS EN MUESTRAS DE LA CUENCA DE PINILLA MEDIANTE COMBINACIÓN LINEAL DE LOS 4 COMPONENTES IDENTIFICADOS POR EL ANÁLISIS PARAFAC



Cada uno de los cuatro componentes obtenidos (Figura 113) representa una tipología diferente de materia orgánica. Así, el componente 1 está relacionado con sustancias húmicas típicas de ambientes fluviales, que se excitan en la región del ultravioleta. El componente 2 responde a un origen húmico vinculado a compuestos de origen vegetal, con una señal muy parecida a la de las quinonas oxidadas. Respecto al componente 3, se relaciona con compuestos húmicos de origen terrestre, asociado a actividades como la agricultura. Por último, el componente 4 aparece ligado a aminoácidos, con una señal prácticamente idéntica a la tirosina, lo que hace presumir un origen antrópico o animal.

3.6.2. Determinación de la biodegradabilidad de los componentes de la materia orgánica identificados Modelo PARAFAC

En este apartado se presentan los resultados del experimento que se llevó a cabo para determinar la degradabilidad de los componentes identificados mediante el análisis PARAFAC. Esta prueba se realizó con las muestras recolectadas en la cuenca de Pinilla durante la última salida de campo el día 20/07/2011, que comprendió un total de 14 puntos (tanto el punto 10 como el 12 estaban secos). Para este experimento las muestras fueron tratadas como réplicas, ya que lo que se buscaba era definir la degradabilidad de los componentes PARAFAC, no describir las propiedades de las muestras.

El experimento consistió en una incubación de las muestras filtradas a 25° C, en un incubador durante 8 días (para los análisis de DOC se extendió hasta 41 días). De forma previa a la incubación (t=0), y en los intervalos de 1, 2, 4 y 8 días se extrajo una alícuota en la que se realizó un análisis de carbono orgánico disuelto (esto también se hizo a los 41 días), así como un análisis espectroscópico. Las matrices EEM obtenidas en este experimento se analizaron conjuntamente con todas las matrices obtenidas del resto de muestras del proyecto, con lo que los componentes PARAFAC analizados en ellas son idénticos a los descritos anteriormente.

Los resultados de este experimento se muestran para cada tiempo de incubación, estandarizándose respecto al intervalo inicial (t=0 días). En primer lugar, el panel superior de la Figura 115 muestra la evolución del carbono orgánico disuelto a lo largo de todo el período de incubación. Según estos resultados, las transformaciones de materia orgánica se producen durante los primeros días, no existiendo apenas variación entre los días 8 y 41. La degradación de la materia orgánica lábil es ya patente a t=1; sin embargo, los diferentes procesos de transformación hacen que los valores de t=2 y t=4 aumenten ligeramente; más tarde se estabilizan en t=8 días.

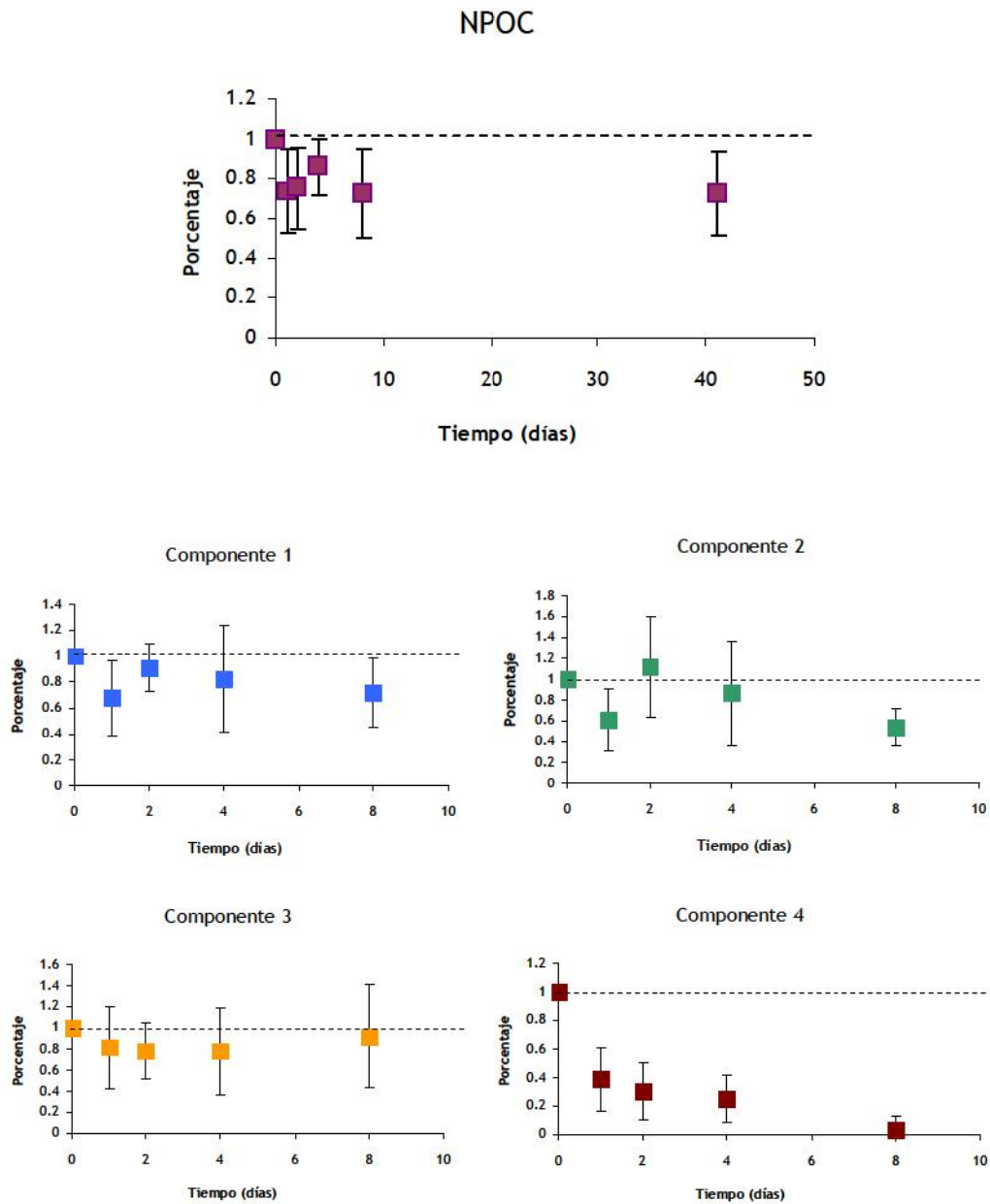
El análisis de la evolución de los componentes PARAFAC (Figura 115) ofrece una interesante visión de lo que acontece con la materia orgánica disuelta.

Por un lado, tanto el componente 1, como el componente 2, siguen un patrón muy similar al del total del carbono orgánico disuelto, con una rápida respuesta de degradación en t=1 día, seguida de unas transformaciones que hacen que el porcentaje aumente en t=2 y t=4, para después estabilizarse en t=8 días.

En el componente 3, sin embargo, apenas se aprecia una degradación final (t=8), y las oscilaciones por transformación son muy pequeñas en los intervalos intermedios, lo que indica un alto grado de refractariedad.

Por último, es el componente 4 (con alto contenido en aminoácidos) el que muestra un alto índice de biodegradabilidad, consumiéndose hasta valores del 22 por ciento en t=1 y llegando a t=8 días, con un porcentaje medio cercano al 0 por ciento. Por lo tanto, hay que destacar que el componente 4 representa no sólo el impacto de actividades humanas en la cuenca, sino que además puede contribuir de forma significativa al consumo de oxígeno en los sistemas acuáticos de la cuenca.

FIGURA 115. EVOLUCIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO DISUELTUO (NPOC) Y DEL PORCENTAJE DE LOS DIFERENTES COMPONENTES PARAFAC IDENTIFICADOS EN ESTE ESTUDIO



Los valores son promedios para todas las muestras analizadas y las barras desviaciones estándar

3.6.3. Variabilidad y distribución de los diferentes componentes de la materia orgánica disuelta

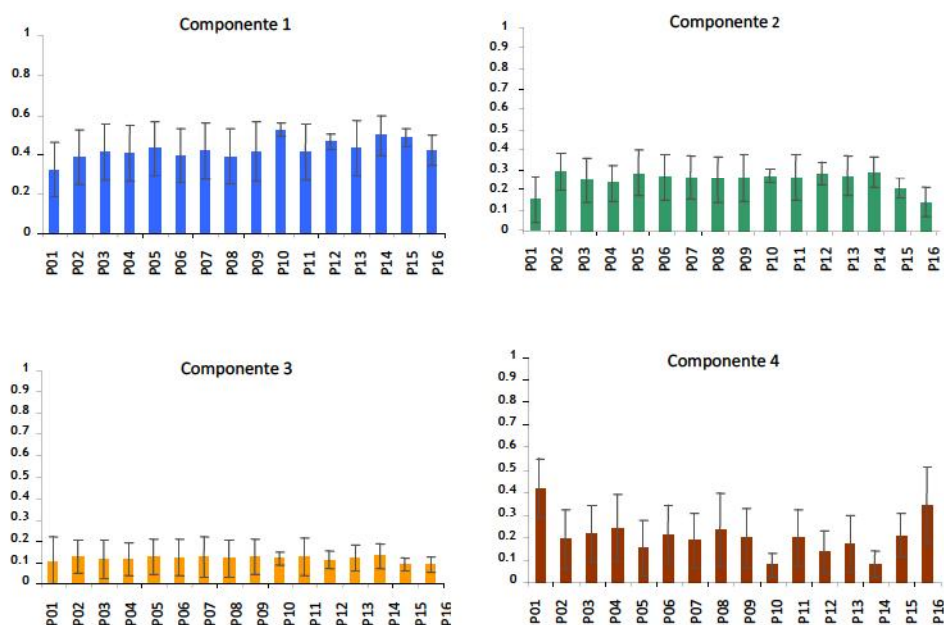
Con el análisis PARAFAC se ha obtenido el porcentaje con que cada componente de la materia orgánica disuelta aparece en cada estación de muestreo. Considerando el total de muestras tomadas en cada una de ellas, se han calculado tanto los valores medios, como la desviación estándar, el máximo y el mínimo, así como la distribución estacional de los componentes en cada periodo definido.

En la figura 116 se presentan los porcentajes medios para cada componente y punto de muestreo, así como su desviación estándar. Respecto al componente 1, éste es el que presenta un mayor porcentaje para la mayoría de los puntos, situándose entre el 32 por ciento (punto 1) y el 53 por ciento (punto 10). A lo largo del eje del cauce principal presenta una suave variación, con ligeros ascensos y descensos. Para el resto de puntos de la cuenca del embalse de Pinilla, así como para el punto 15 y el punto 16, el porcentaje se sitúa por encima de la mayoría de los valores aguas arriba del embalse (a excepción de punto 10). Por otro lado, destaca la poca variabilidad que se observa en los puntos 10 y 12, hecho que se repite con el resto de componentes, y que hace presumir que la composición de la materia orgánica en estos dos puntos permanece muy constante a lo largo del año.

En cuanto al componente 2, destacan los bajos valores en los puntos 1 y 16, (14 y 15 por ciento, respectivamente). Para el resto de puntos, el porcentaje medio se sitúa entre el 20 y el 30 por ciento, alcanzando su máximo en el punto 14 (29%).

El componente 3 es el de menor peso para todos los puntos; su porcentaje medio oscila entre el 9 y el 13 por ciento, y su variabilidad es baja no sólo en los puntos 10 y 12, sino también en los puntos 15 y 16.

FIGURA 116. PORCENTAJE MEDIO DE CADA COMPONENTE PRESENTE EN CADA ESTACIÓN DE MUESTREO PARA EL CONJUNTO DE LAS MUESTRAS TOMADAS

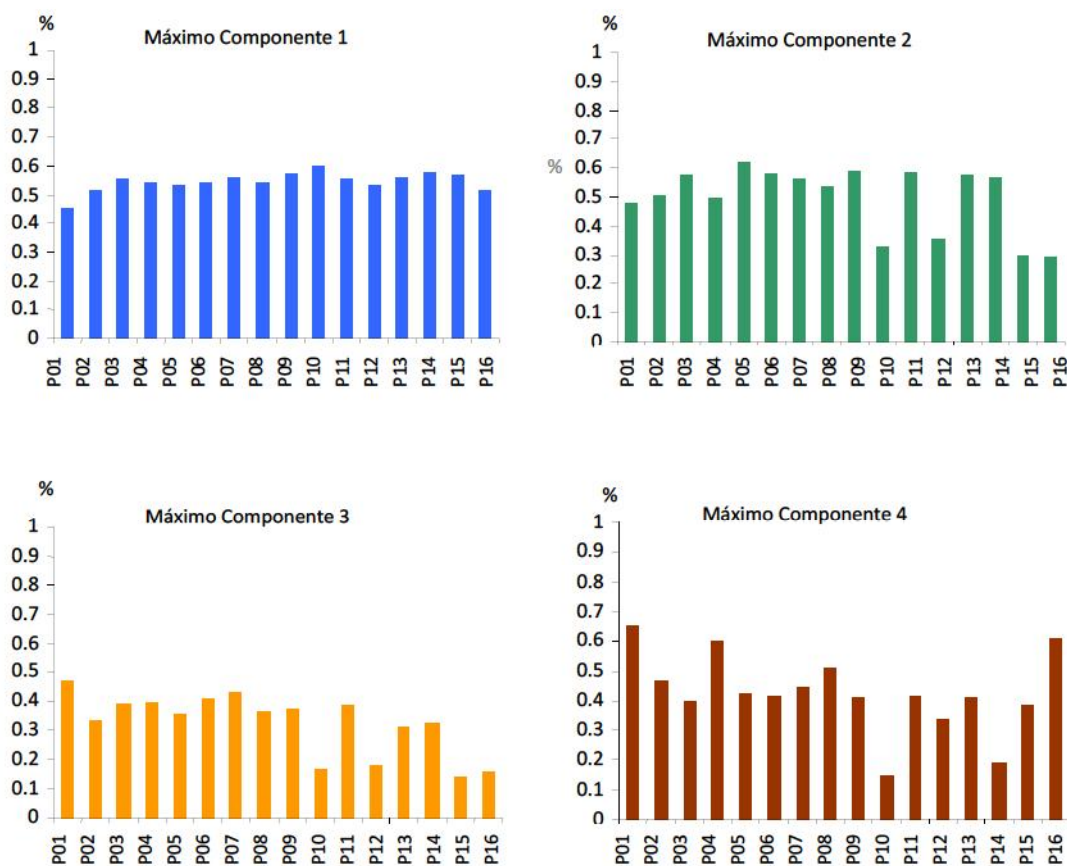


Las barras son desviaciones estándar durante todo el periodo de estudio

Por último, el componente 4 es el que presenta una mayor diferencia entre puntos. Los mínimos se encuentran en los puntos 10 y 14 (8%), para llegar a máximos del 42 y 35 por ciento en los puntos 1 y 16, respectivamente. Si utilizamos este componente como un indicador del impacto antrópico por cargas de materia orgánica lábil, vemos que los puntos más influenciados serían, aparte de los ya mencionados, los puntos 4, 8, 3, 6 y 15, con valores superiores al 20 por ciento.

En el análisis del porcentaje máximo de cada componente (Figura 117), destacan los puntos 10, 12, 15 y 16, con valores comparativamente bajos tanto para el componente 2 (cerca del 30 por ciento) como para el componente 3 (alrededor del 15 por ciento). Por otra parte, respecto al componente 4, los puntos 10 y 14 muestran un máximo muy bajo (14 y 19%), destacando el de los puntos 1, 4, 8 y 16 (entre el 50 y el 60%).

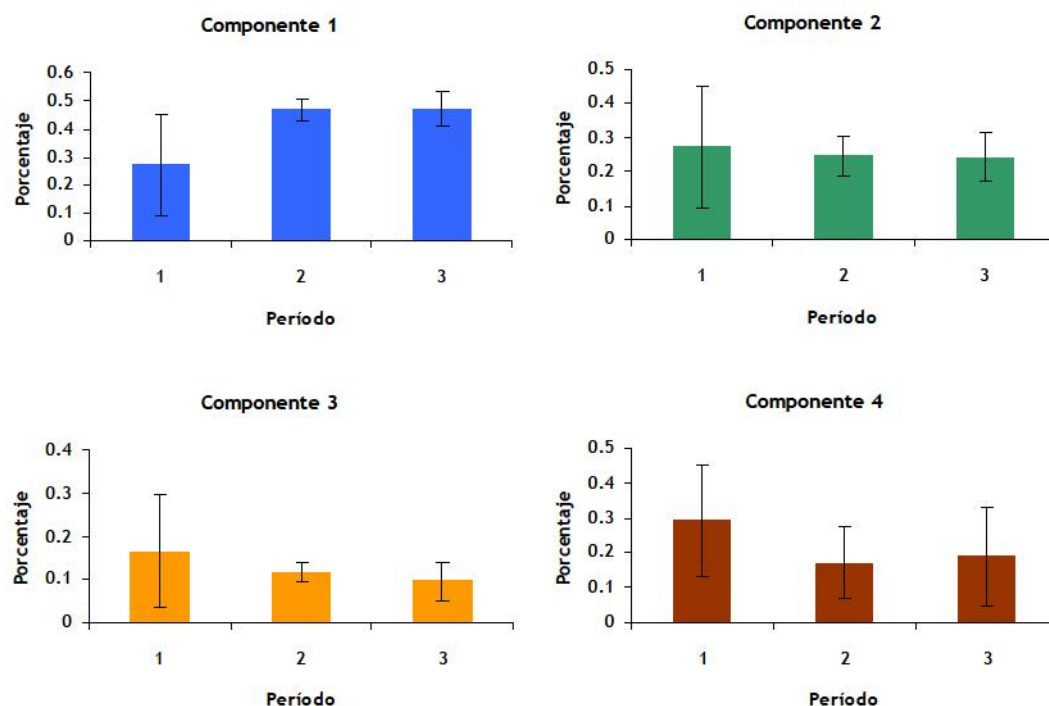
FIGURA 117. PORCENTAJE MÁXIMO DE CADA COMPONENTE PRESENTE EN CADA ESTACIÓN DE MUESTREO PARA EL CONJUNTO DE LAS MUESTRAS TOMADAS



En cuanto a los mínimos (no mostrados en la figura 117), en el componente 1, destaca de forma especial el porcentaje para los puntos 10 y 12 (35-40%) así como para los puntos 14, 15, y 16. El resto de puntos presentan valores mínimos de 0. En el componente 2 es donde se observan unos mínimos más elevados para el conjunto de puntos (entre el 3 y el 21 por ciento). El componente 3 es muy bajo para todos los puntos (sólo el punto 10 supera el 5 por ciento). Por último, el componente 4 presenta un mínimo comparativamente elevado en el punto 1 (19%), y sólo los puntos 15, 16, 2 y 4 son superiores a 0.

Se ha analizado también la variación estacional de la composición de la materia orgánica, considerando el total de puntos y muestras, y los tres subperíodos en los que se dividió el período de estudio, reflejados en la figura 118. El resultado muestra que es durante el primer período (12/07/10 al 28/10/10) cuando se puede observar una mayor variabilidad en la composición de la materia orgánica. Así, durante este período, el componente 1 disminuye su porcentaje a favor del componente 4, comportamiento que se invierte durante el segundo y tercer período. Respecto a los componentes 2 y 3, las variaciones no son muy fuertes, si bien el componente 3 disminuye levemente conforme se suceden los períodos. Este patrón parece indicar que es durante los meses de verano durante los que se registra una mayor variabilidad, especialmente por lo que respecta al incremento de la materia orgánica disuelta con marcado origen antrópico y alta degradabilidad (componente 4).

FIGURA 118. PORCENTAJE MEDIO DE MATERIA ORGÁNICA DISUELTA PARA CADA COMPONENTE Y PERÍODO DE ESTUDIO



Las barras son desviaciones estándar

En general, todos los puntos de muestreo siguen el patrón general mostrado en la figura 118, aunque se producen excepciones. Los puntos 1, 7, 8 y 11 no presentan la tendencia mostrada para el componente 4 considerando todas las muestras, sino que éste componente presenta valores tanto o más altos en el periodo 3, como en el periodo 1. Esto es significativo, ya que el periodo 3 es mucho más húmedo que el primero, lo que parece indicar que los aportes de materia orgánica lábil de origen humano no están necesariamente ligados a aportes puntuales constantes en el tiempo.

3.6.4. Resumen de los principales hallazgos

Las siguientes tablas resumen la composición de la materia orgánica disuelta en cada una de las estaciones de muestreo de la cuenca del embalse de Pinilla. La primera de ellas, (Tabla 26) muestra los valores medios y destaca que, salvo para el punto 1, el componente 1 (sustancias húmicas típicas de ambientes fluviales con cierta capacidad de biodegradarse) es el que registra un mayor porcentaje. En el punto 1, sin embargo, es el componente 4 (origen antrópico y muy lábil) el que tiene un mayor peso.

TABLA 26. PORCENTAJE MEDIO DE CADA COMPONENTE PARAFAC MEDIDO EN LA MATERIA ORGÁNICA DISUELTA EN CADA UNO DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

Medio	% Componente 1	% Componente 2	% Componente 3	% Componente 4
Punto 1	0,32	0,15	0,13	0,42
Punto 2	0,39	0,29	0,13	0,19
Punto 3	0,41	0,25	0,12	0,22
Punto 4	0,41	0,23	0,12	0,24
Punto 5	0,43	0,29	0,13	0,16
Punto 6	0,40	0,26	0,12	0,22
Punto 7	0,42	0,26	0,13	0,19
Punto 8	0,39	0,25	0,12	0,24
Punto 9	0,42	0,26	0,13	0,20
Punto 10	0,53	0,27	0,12	0,08
Punto 11	0,42	0,26	0,13	0,20
Punto 12	0,47	0,28	0,11	0,14
Punto 13	0,43	0,27	0,12	0,17
Punto 14	0,50	0,29	0,13	0,08
Punto 15	0,49	0,21	0,09	0,21
Punto 16	0,42	0,14	0,09	0,35

Se destaca el componente de mayor porcentaje para cada punto

En la tabla 27 se exponen los valores mínimos, los cuales indican que ahora es el componente 2 (materiales parecidos a las quinonas oxidadas) el que manifiesta su presencia de forma más constante, para la mayoría de los puntos. Las excepciones son los puntos 10, 12, 15 y 16, que continúan con el componente 1 como el mínimo más elevado, al igual que sucede en el punto 1 con el componente 4.

Por último, la tabla 28 presenta los porcentajes máximos, en los que las diferencias entre componentes no son muy marcadas. Tanto el componente 1 (puntos 2, 7, 8, 10, 12, 14 y 15), como el componente 2 (puntos 2, 3, 5, 6, 7, 9, 11, 13 y 14) dominan en la mayoría de los puntos, destacando el componente 4 en los puntos 1, 4 y 16. El componente 3, al igual que en las anteriores tablas, es el que presenta menores porcentajes.

En resumen, se puede afirmar que la información obtenida mediante el análisis de fluorescencia y **PARAFAC** es muy útil a la hora de caracterizar la materia orgánica a escala de cuenca. No sólo permite distinguir diferentes tipologías de materia orgánica y su distribución espacial y temporal, sino que también permite esclarecer propiedades ecosistémicas importantísimas como la biodegradabilidad a corto término. También permite detectar impactos humanos, que no se definen bien en los análisis clásicos de cálculo de cargas, como lo demuestran los resultados en los puntos 1 y 4, probablemente muy influenciados por la estación de esquí y el área recreativa de Las Presillas, respectivamente. Como se demostrará más adelante, la información sobre la degradabilidad y la composición relativa de componentes se puede utilizar para definir mejor las dianas para la aplicación de medidas de mitigación, lo que supone una aplicación novedosa de este tipo de información en un trabajo sobre remediación de procesos de eutrofización.

TABLA 27. PORCENTAJE MÍNIMO DE CADA COMPONENTE PARAFAC MEDIDO EN LA MATERIA ORGÁNICA DISUELTA EN CADA UNO DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

Mínimo	% Componente 1	% Componente 2	% Componente 3	% Componente 4
Punto 1	0,00	0,03	0,00	0,20
Punto 2	0,00	0,16	0,02	0,02
Punto 3	0,00	0,14	0,00	0,00
Punto 4	0,00	0,05	0,03	0,01
Punto 5	0,00	0,16	0,00	0,00
Punto 6	0,00	0,13	0,03	0,00
Punto 7	0,00	0,17	0,01	0,00
Punto 8	0,00	0,12	0,01	0,00
Punto 9	0,00	0,14	0,02	0,00
Punto 10	0,46	0,19	0,06	0,00
Punto 11	0,00	0,13	0,02	0,00
Punto 12	0,40	0,15	0,03	0,00
Punto 13	0,00	0,16	0,03	0,00
Punto 14	0,11	0,21	0,04	0,00
Punto 15	0,40	0,10	0,02	0,06
Punto 16	0,28	0,05	0,03	0,05

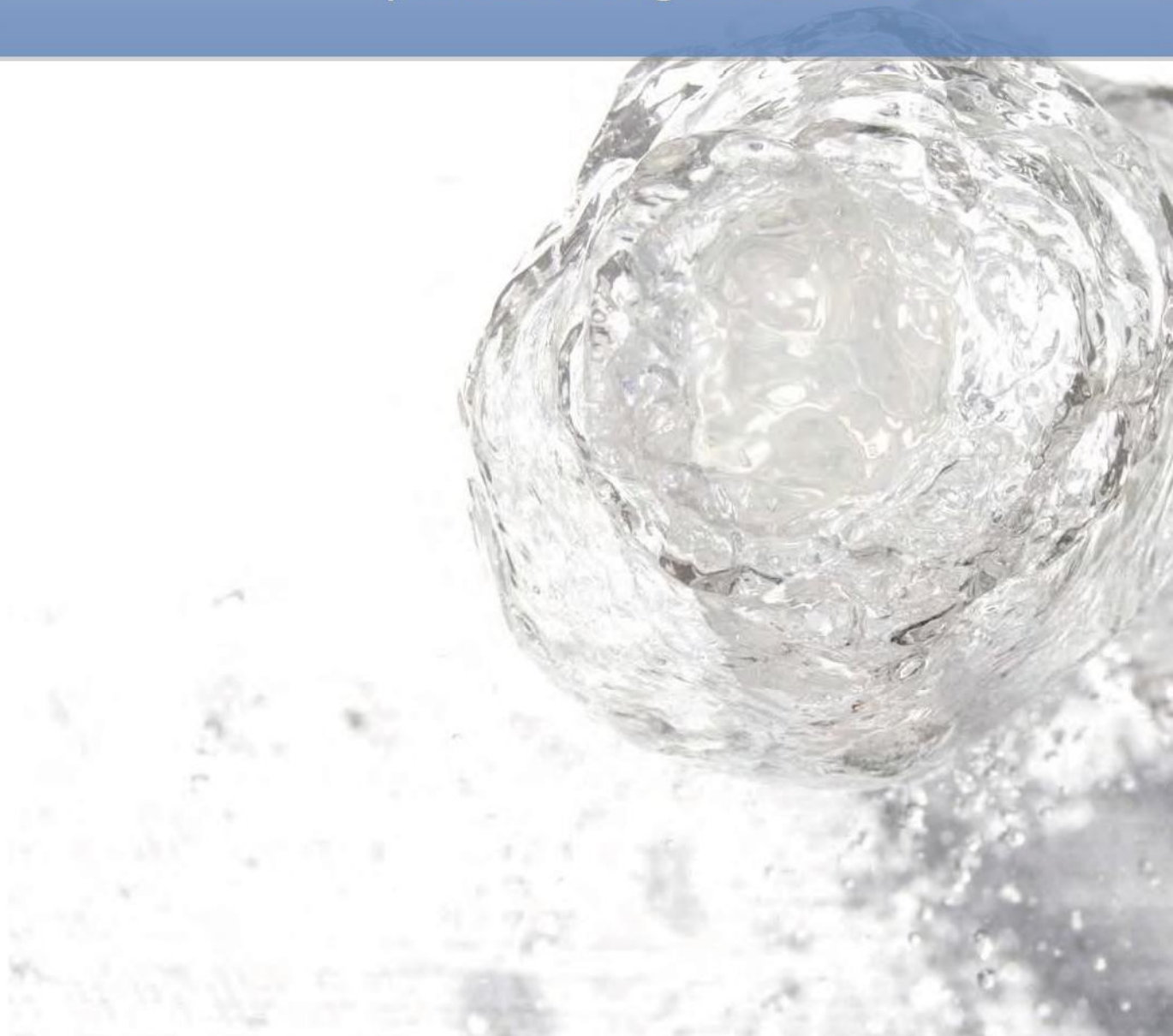
Se destaca el componente de mayor porcentaje para cada punto

TABLA 28. PORCENTAJE MÁXIMO DE CADA COMPONENTE PARAFAC MEDIDO EN LA MATERIA ORGÁNICA DISUELTA EN CADA UNO DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

Máximo	% Componente 1	% Componente 2	% Componente 3	% Componente 4
Punto 1	0,45	0,48	0,47	0,65
Punto 2	0,51	0,51	0,33	0,46
Punto 3	0,56	0,57	0,39	0,40
Punto 4	0,54	0,49	0,40	0,60
Punto 5	0,53	0,62	0,36	0,42
Punto 6	0,55	0,58	0,41	0,41
Punto 7	0,56	0,56	0,43	0,44
Punto 8	0,54	0,53	0,36	0,51
Punto 9	0,57	0,59	0,37	0,41
Punto 10	0,60	0,32	0,17	0,15
Punto 11	0,56	0,58	0,39	0,41
Punto 12	0,53	0,35	0,18	0,34
Punto 13	0,56	0,57	0,31	0,41
Punto 14	0,57	0,57	0,32	0,19
Punto 15	0,57	0,30	0,14	0,38
Punto 16	0,52	0,29	0,16	0,61

Se destaca el componente de mayor porcentaje para cada punto

4. Modelación de las cargas de nutrientes y materia orgánica al embalse



El cálculo de los balances de nutrientes mediante información recogida en el campo es una primera aproximación práctica al estudio de los aportes difusos y puntuales a un cuerpo de agua. Sin embargo, esta aproximación suele adolecer de una limitación que hace muy recomendable complementar este tipo de estudios con una modelación empírica del problema. Los vertidos suelen sufrir procesos de transformación a lo largo de su recorrido por los suelos o por los cauces fluviales. Esto hace que muchas veces los balances sean difíciles de interpretar, ya que no se pueden asignar con seguridad las cargas medidas en los ríos a las diferentes fuentes potenciales. Además, nunca se puede asegurar con certeza que los inventarios de vertidos sean completos y fiables.

Una forma de completar la información que proporcionan los balances es modelar numéricamente los procesos implicados. Esto puede hacerse con modelos dinámicos que incorporan ecuaciones para todos los procesos presuntamente implicados en el transporte de materiales hasta el embalse, y que resuelven estas ecuaciones preservando las relaciones espaciales entre las diferentes partes del terreno. Pese a que estas aproximaciones son atractivas dada la gran cantidad de información que pueden llegar a proporcionar, su puesta a punto es costosísima, con procesos de calibración y validación que demandan gran esfuerzo y una base de datos de campo muy completa.

Afortunadamente, existen aplicaciones intermedias entre los modelos dinámicos y los cálculos de balances. Se trata de métodos empíricos que incorporan en su estructura matemática descripciones sucintas de los procesos más relevantes que intervienen en el transporte de materiales desde las cuencas hasta los embalses. Se trata de hecho de regresiones que deben ajustarse empíricamente con los datos obtenidos en el campo.

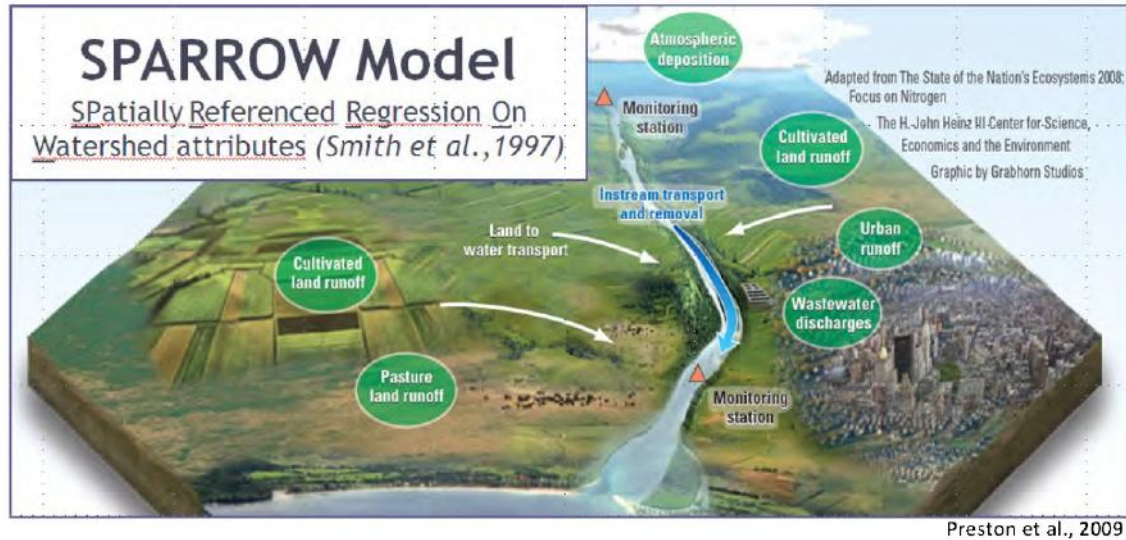
4.1. MODELO SPARROW

De todos los métodos disponibles para este tipo de aproximación, el modelo **SPARROW** (Spatially Referenced Regression on Watershed Attributes) es el último avance en este tipo de modelos (Alexander et al., 2000; 2002). **SPARROW** ha sido testado con éxito en múltiples aplicaciones en diversos países, y se trata de una de las herramientas más utilizadas internacionalmente para este tipo de estudios. Además, el U.S. Geological Survey mantiene actualizado el modelo, y el equipo de investigación FLUMEN tiene comunicación directa con los desarrolladores del modelo.

SPARROW es un modelo del tipo "*Empirical land-use regression*", que utiliza los datos del inventario de vertidos y de la carga del río para ajustar una serie de ecuaciones que describen, de una forma básica, los procesos de transformación de los nutrientes en el suelo y en los cauces fluviales. Como las ecuaciones se resuelven simultáneamente para todas las subcuencas definidas por la red de muestreo, que necesariamente tendrán cierto solapamiento de usos del suelo, la estructura matemática del modelo puede resolver los procesos de cargas desde los usos del suelo y las transformaciones y transporte en los cauces fluviales. De esta manera, se puede llegar a una estimación de la aportación final de cada aporte después de los procesos de autodepuración a escala de cuenca, con su incertidumbre asociada. La estructura del modelo también le hace ser muy robusto frente a la falta de información precisa acerca de los aportes difusos y puntuales, lo que por otra parte es muy habitual en la Península.

Básicamente, **SPARROW** calibra una regresión no lineal que relaciona las cargas medidas en el campo en una red de muestreo con las fuentes potenciales de los materiales modelados, incluyendo el procesado en los cauces. La figura 119 resume sucintamente el funcionamiento del modelo y las ecuaciones básicas.

FIGURA 119. DIAGRAMA CONCEPTUAL DE SPARROW CON LA ECUACIÓN MAESTRA QUE SE HA DE CALIBRAR CON LOS DATOS DE CAMPO



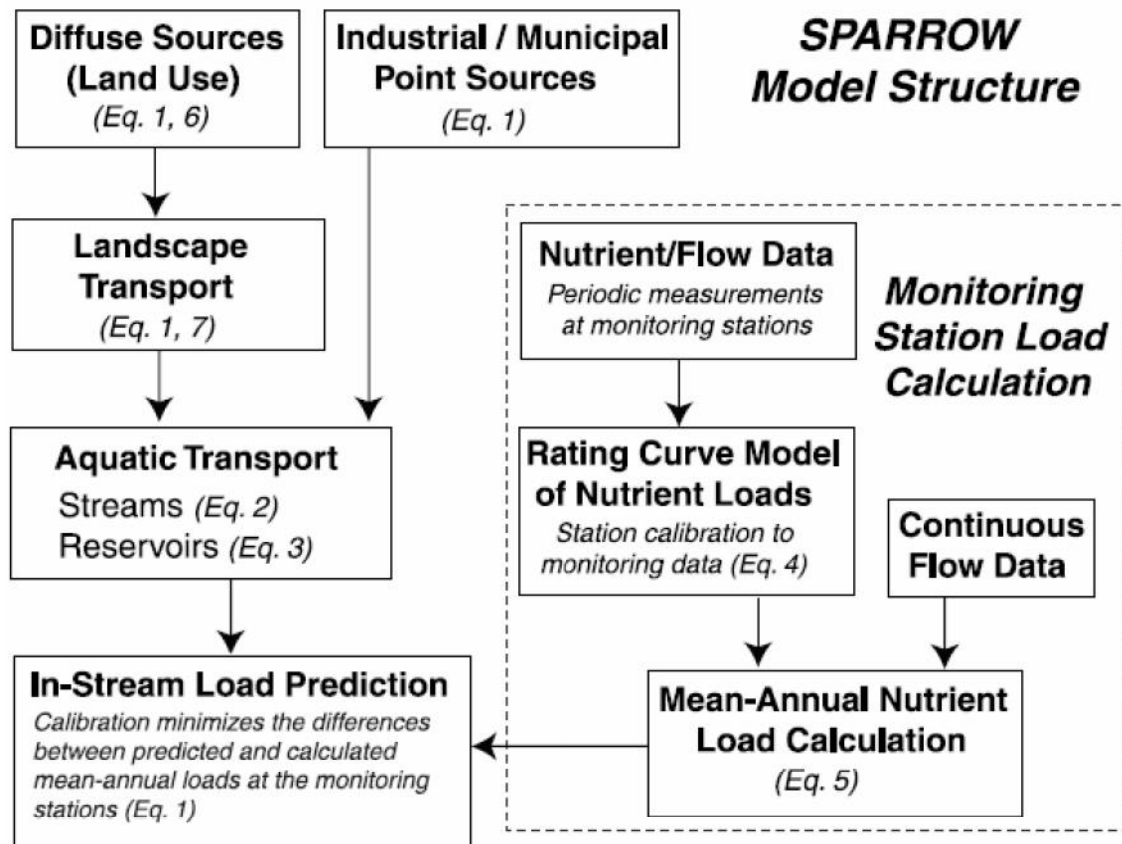
Estimated load (L_i) at a given reach = Sum of two components

$$L_i = \left[\sum_{j \in J(i)} L'_j \right] F(Z_i^A; \theta_A) + \left[\sum_{n=1}^{N_S} S_{n,i} \alpha_n D_n(Z_i^D; \theta_D) \right] F'(Z_i^A; \theta_A)$$



La base del proceso de modelación es, por lo tanto, la información de cargas calculada en función de la información recogida en el campo. Esto sería equivalente a los datos elaborados en el capítulo 3 de este documento para la cuenca de Pinilla. Estas cargas intentan ser modeladas sobre la delineación de una serie de subcuencas en el terreno, a las que se asigna una serie de propiedades (usos del suelo, generación de escorrentía, hidrología e hidráulica del cauce), a las que se relacionan parámetros ajustables en el marco de unas ecuaciones que intentan describir el balance de masas en la red fluvial. La Figura 120 resume la estructura del modelo y los cálculos implicados. Esta estructura permite, no sólo diferenciar las cargas según sus orígenes, sino también la obtención de información sobre la distribución espacial de las cargas, tanto en cuencas monitorizadas como no monitorizadas.

FIGURA 120. ESTRUCTURA BÁSICA DEL MODELO SPARROW



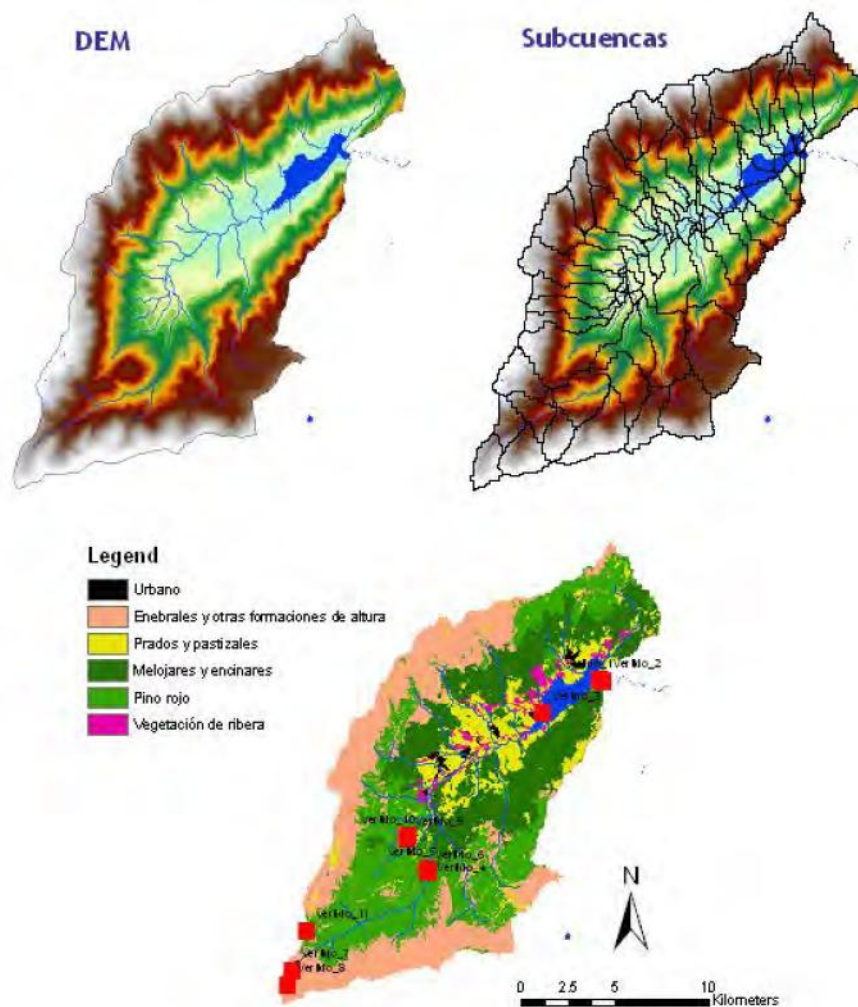
4.2. IMPLEMENTACIÓN DE SPARROW EN LA CUENCA DE PINILLA

Se resumen en este apartado todas las actuaciones encaminadas a implementar *SPARROW* en la cuenca de Pinilla, que incluyen tanto la búsqueda de información como el procesado previo de ésta para adecuarla a los formatos que demanda *SPARROW*, y que de hecho constituye la parte más costosa del proceso de modelación. Cabe indicar aquí que el modelo *SPARROW* se aplicó para los tres periodos considerados en el cálculo de cargas en este estudio (Figura 15), aunque la parametrización del modelo fue homogéneo en todos los casos, incluyendo un factor de escorrentía para dar cuenta de la generación de escorrentía diferencial durante los tres periodos.

4.2.1. Recopilación de datos necesarios para la modelación

A partir de la base cartográfica del mapa de elevación digital del terreno y el de usos del suelo de la Comunidad de Madrid (Figura 121), y mediante el uso del software ARCGIS se dividió la cuenca en 84 subcuencas, 15 de las cuales coincidían con los 15 puntos de muestreo extendidos en la cuenca, definidos en este estudio, y que serían los puntos de calibración del modelo.

FIGURA 121. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (DEM) PARA LA CUENCA DE PINILLA, Y LAS 84 SUBCUENCAS CONSIDERADAS PARA LA MODELACIÓN EN SPARROW (arriba). USOS DEL SUELO CONSIDERADOS EN LA CUENCA, CON DETALLE DE LOS VERTIDOS PUNTUALES INCLUIDOS EN LA INFORMACIÓN FACILITADA POR LA CONFEDERACIÓN HIDROLÓGICA DEL TAJO (abajo)



A partir de esta información básica, se obtuvieron los siguientes datos necesarios para la implementación del modelo *SPARROW*, con referencia al método utilizado para su obtención:

1. **Longitud del tramo de río** en cada una de las 84 subcuencas (GIS).
2. **Carga hidráulica en el embalse** ($m \text{ periodo}^{-1}$), a partir del balance hidrológico del embalse y datos fisiográficos.
3. **Tiempo de residencia del agua** en los 84 tramos fluviales (días), a partir de la velocidad del agua medida durante el cálculo de aforos y la longitud del tramo mediante GIS.
4. **Velocidad del agua** ($ms \text{ s}^{-1}$), relaciones de escala utilizando los datos de campo de la velocidad del agua y los caudales calculados como referencia.

5. **Profundidad media del tramo (m)**, calculada mediante relaciones de escala utilizando los datos de campo y los caudales como referencia.
6. **Carga hidráulica** en los tramos de río ($m \text{ día}^{-1}$), función de la longitud del tramo, la velocidad del agua y la profundidad.
7. **Cargas estimadas** con LOADEST en los puntos de calibración ($kg \text{ periodo}^{-1}$), es decir, en la red de puntos de muestreo.
8. **Caudal medio** (cfs, relaciones de escala utilizando los datos de campo y los caudales de entrada al embalse como referencia. Se distinguen diferentes tipos de tramos).
9. **Concentración** media del compuesto sujeto a modelación a partir de los datos de campo. En cuencas no monitorizadas se asumió la misma relación -concentración vs. caudal- encontrada en el punto monitorizado más cercano.
10. **Áreas totales** aguas arriba de la salida de la subcuenca, y área propia de la subcuenca drenada (km^2), estimada a partir de GIS.
11. **Escorrentía** generada en cada una de las cuencas, estimada a partir del caudal asignado a la cuenca y del área de la misma.
12. **Áreas de los diferentes usos del suelo** en cada cuenca, a partir de la información GIS. En principio se intentó trabajar con la leyenda que se muestra en la figura 121, que incluye 6 tipos de uso del suelo. Sin embargo, ya en estados tempranos de la calibración de los modelos quedó claro que la información de campo no contenía suficiente información como para asignar un valor de carga por cada uso del suelo de forma estadísticamente significativa. Por ello, se decidió simplificar esta leyenda combinando las formaciones de altura y el pino rojo en una entrada que se denominó ALTURA, y los prados, bosques de ribera y encinares en una entrada que se denominó PRADOS. Por lo tanto, los modelos definitivos incluyen tres tipos de uso del suelo, los dos citados y el uso URBANO.
13. **Inventario de aportes difusos y puntuales**. De forma simultánea a la obtención de datos a través de los muestreos de campo, se intentaron obtener todo los datos posibles sobre:
 - a) Caudal y concentración de nutrientes y materia orgánica en los efluentes de las EDAR de Pinilla y de vertidos controlados localizados dentro de la cuenca del embalse de Pinilla.
 - b) Aplicación de fertilizantes en las explotaciones agrícolas en la cuenca del embalse.
 - c) Explotaciones ganaderas en la cuenca, especialmente las de tipo extensivo.

En cuanto a la EDAR, los datos de nutrientes y materia orgánica utilizados han sido los recogidos mediante los muestreos realizados durante el período de estudio, ya que se definió un punto de muestreo en el efluente para ese propósito. Los datos de caudal de la EDAR, se limitan a las fechas de muestreo, por lo que la estimación de caudal diario se ha realizado mediante una interpolación lineal. Respecto a los vertidos controlados localizados dentro de la cuenca del embalse, los datos a los que se ha tenido acceso son los publicados en el inventario de vertidos autorizados de la Confederación Hidrográfica del Tajo, a través de su página web (www.chtajo.es), (Figura 121). Esta información consiste básicamente en volúmenes anuales de vertido declarados, lo que supone una información muy pobre para la modelación. Estos puntos se incluyeron en **SPARROW** considerando estos volúmenes, y definiendo un parámetro en el modelo que daría cuenta de la concentración promedio de esos efluentes. Los aportes difusos se modelaron exclusivamente atendiendo a las áreas de cada uso del suelo en las subcuencas.

4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO SPARROW

En el presente apartado se exponen los valores de los parámetros, la incertidumbre asociada y los resultados de la calibración, para cada uno de los compuestos modelados: amonio, nitrato, nitrógeno total, fósforo total, DQO, carbono particulado, DOC, hierro, manganeso y silicato. Para cada uno de los 10 modelos se dispone de 41 puntos de calibración, es decir, los datos de cargas para los 15 puntos de la cuenca en los tres periodos considerados para el cálculo de cargas con **LOADEST**, exceptuando los puntos en los que el caudal era cero. Los compuestos con abundantes datos por debajo del límite de cuantificación no fueron tenidos en cuenta para la modelación (particularmente nitrito y fósforo reactivo soluble).

SPARROW incluye dos métodos para el ajuste de parámetros y cálculo de la incertidumbre. Por un lado, se dan los parámetros calculados con un método de gradiente que asume una aproximación lineal. Por el otro, SPARROW utiliza una aproximación de remuestreo **bootstrap**. En las tablas 29 a 37 se dan los valores así obtenidos para cada parámetro calibrado en el modelo, así como la respectiva incertidumbre.

Los parámetros son los siguientes:

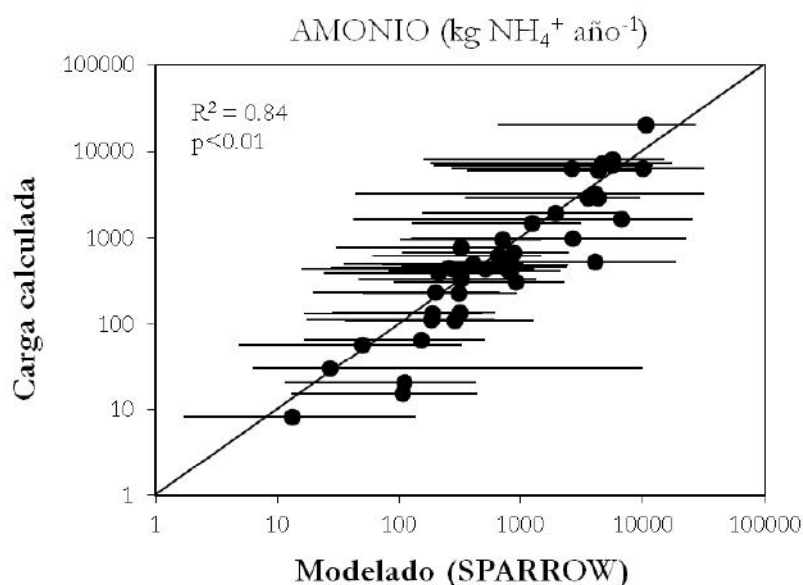
1. URBANO. Carga nominal del constituyente desde el uso de suelo URBANO, en $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.
2. ALTURA. Carga nominal del constituyente desde el uso de suelo ALTURA, en $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.
3. PRADOS. Carga nominal del constituyente desde el uso de suelo PRADOS, en $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.
4. POINT_US. Concentración en los aportes puntuales inventariados por la CHT (mg L^{-1}).
5. RCHDECAY_A. Intercept para la relación potencial que rige el secuestro neto del constituyente por los cursos fluviales, sin unidades.
6. RESDECAY. Exponente para la relación que relaciona el tiempo de residencia del agua en el embalse con el porcentaje de constituyente que es retenido en el mismo, adimensional.
7. POWER_B. Exponente para la relación potencial que rige el secuestro neto del constituyente por los cursos fluviales, adimensional.
8. Land to water delivery coeff. Coeficiente adimensional que matiza la carga nominal desde los usos del suelo con el valor de escorrentía generado en cada periodo. Esto permite tener exportaciones diferentes desde los usos del suelo e función de las variaciones climáticas en cada periodo.

Aparte del valor de los parámetros calibrados, en las tablas también se puede consultar la variabilidad explicada por el modelo (R_SQUARE) en espacio logarítmico, y el p-valor (PVAL) para la regresión calculada asumiendo la aproximación lineal. Finalmente, se incluye un gráfico con la comparación entre valores observados y modelados en espacio logarítmico. Hay que destacar que todos los modelos menos el de nitrato resultaron significativos estadísticamente, y explicaron una variabilidad superior al 80%. Por otra parte, hay que destacar también el valor extremadamente alto para la carga por uso URBANO en prácticamente todos los constituyentes, lo que apunta a que SPARROW asigna de esta forma cargas que en realidad deberían estar inventariadas como puntuales.

TABLA 29. VALORES DE LOS PARÁMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL AMONIO, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO

AMONIO	Parametric	SD	Bootstrapped	SD	CI_low	CI_high
URBANO (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2336.56	1168.19	2120.65	1375.65	0.00	4026.60
ALTURA (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	35.62	14.08	27.31	37.32	0.00	61.11
PRADOS (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	59.25	30.83	9.89	105.41	0.00	94.21
POINT_US (unitless)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RCHDECAY_A (unitless)	0.015	0.005	0.005	0.022	0.00	0.028
RESDDECAY (unitless)	8.894	26.305	2.130	24.518	-10.000	27.788
POWER_B (unitless)	0.090	0.044	0.098	0.256	-0.095	1.052
Land to water delivery coeff (unitless)	0.048	0.032	0.040	0.049	0.00	0.096
R_SQUARE	0.84					
PVAL	0.0056					

FIGURA 122. CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE AMONIO CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW

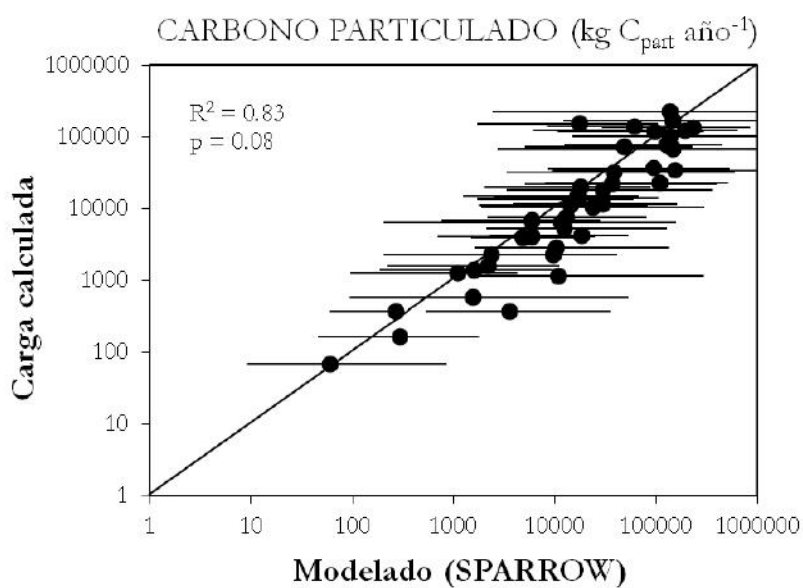


Las barras representan la incertidumbre calculada por el método bootstrap

TABLA 30. VALORES DE LOS PARÁMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL CARBONO TOTAL PARTICULADO, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO

CARBONO PARTICULADO	Parametric	SD	Bootstrapped	SD	Cl_low	Cl_high
URBANO (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ALTURA (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	906.31	452.28	797.75	1123.58	0.00	1547.41
PRADOS (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2652.49	1289.16	1306.96	7636.18	0.00	4576.57
POINT_US (unitless)	0.07	0.49	0.00	1.06	0.00	0.14
RCHDECAY_A (unitless)	0.006	0.002	0.003	0.009	0.000	0.009
RESDECAY (unitless)	1.960	4.229	-4.946	18.565	-10.000	3.714
POWER_B (unitless)	-1.956	0.137	-2.095	0.372	-3.054	-1.709
Land to water delivery coeff (unitless)	0.032	0.041	0.023	0.042	0.000	0.065
<i>R_SQUARE</i>	<i>0.83</i>					
<i>PVAL</i>	<i>0.08</i>					

FIGURA 123. CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE CARBONO TOTAL PARTICULADO, CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW

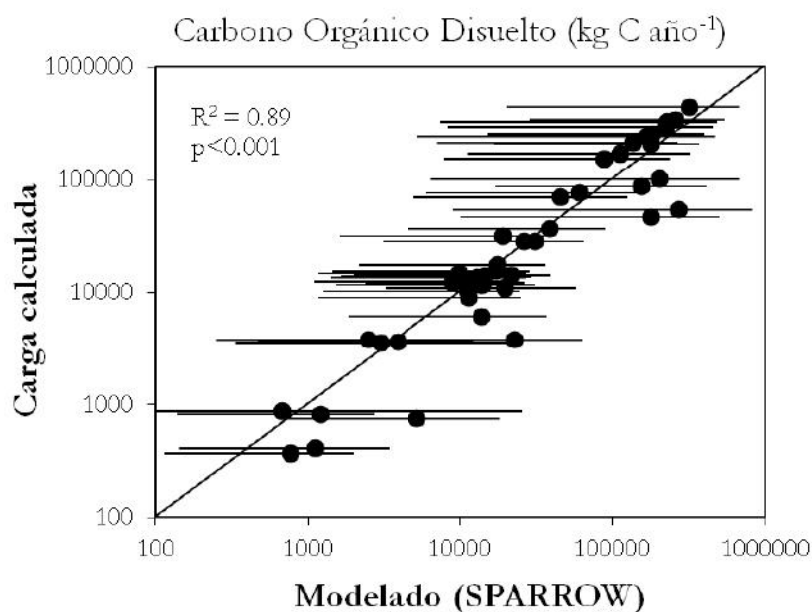


Las barras representan la incertidumbre calculada por el método bootstrap

TABLA 31. VALORES DE LOS PARÁMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL CARBONO ORGÁNICO DISUELTO, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO

CARBONO ORGÁNICO DISUELTO (DOC)	Parametric	SD	Bootstrapped	SD	CI_low	CI_high
URBANO (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	9191.1	10473.1	0.00	0.00	0.00	15646.2
ALTURA (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	1725.5	622.4	1672.7	816.4	0.00	2841.3
PRADOS (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2277.0	1071.9	2081.7	1187.7	0.00	3386.8
POINT_US (unitless)	0.00	0.00	-0.061	0.448	0.00	0.000
RCHDECAY_A (unitless)	0.023	0.007	0.021	0.009	0.00	0.034
RESDECAY (unitless)	2.972	3.801	2.002	9.951	-2.334	7.059
POWER_B (unitless)	-1.775	0.423	-1.740	0.495	-2.840	-0.819
Land to water delivery coeff (unitless)	0.045	0.028	0.036	0.042	0.00	0.089
R_SQUARE	0.89					
PVAL	0.000023					

FIGURA 124. CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO, CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW

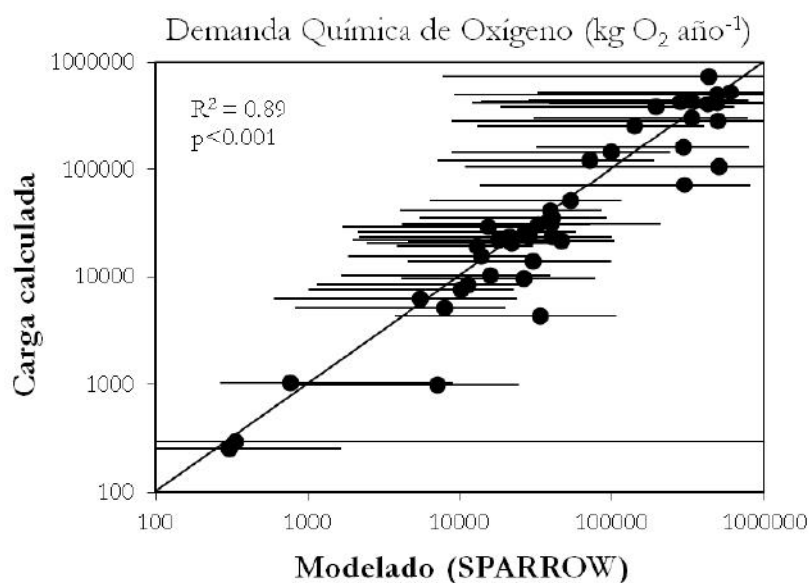


Las barras representan la incertidumbre calculada por el método bootstrap

TABLA 32. VALORES DE LOS PARÁMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO

DQO	Parametric	SD	Bootstrapped	SD	CI_low	CI_high
URBANO (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	37355.6	25489.3	23219.8	30847.6	0.00	53123.2
ALTURA (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2418.5	860.4	2279.6	1159.4	0.00	3881.3
PRADOS (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2636.6	1512.3	2341.2	1385.6	0.00	3985.2
POINT_US (unitless)	0.00	0.00	0.00	0.737	0.00	0.00
RCHDECAY_A (unitless)	0.027	0.005	0.022	0.018	0.00	0.037
RESDECAY (unitless)	4.108	4.849	0.341	13.767	-7.548	5.123
POWER_B (unitless)	-1.495	0.262	-1.442	0.442	-2.288	-0.370
Land to water delivery coeff (unitless)	0.054	0.031	0.045	0.044	0.00	0.109
R_SQUARE	0.89					
PVAL	0.000085					

FIGURA 125. CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, CALCULADAS CON *LOADEST* Y LAS DE *SPARROW*

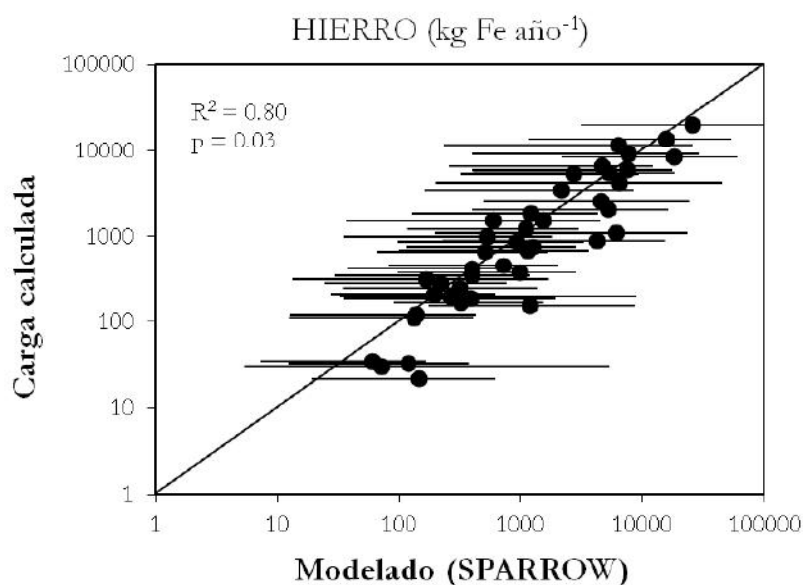


Las barras representan la incertidumbre calculada por el método bootstrap

TABLA 33. VALORES DE LOS PARÁMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL HIERRO, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO

HIERRO	Parametric	SD	Bootstrapped	SD	CI_low	CI_high
URBANO (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	260.41	354.19	0.00	0.00	0.001	520.81
ALTURA (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	38.97	14.50	28.00	34.68	0.001	60.87
PRADOS (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	53.41	35.71	0.00	0.00	0.001	88.24
POINT_US (unitless)	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
RCHDECAY_A (unitless)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RESDECAY (unitless)	-1.60	0.74	-8.36	14.48	-10.00	-1.55
POWER_B (unitless)	-1.52	0.60	-1.49	0.65	-2.59	0.12
Land to water delivery coeff (unitless)	0.04	0.04	0.03	0.04	0.00	0.08
R_SQUARE	0.80					
PVAL	0.03					

FIGURA 126. CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE HIERRO CALCULADAS CON *LOADEST* Y LAS DE *SPARROW*

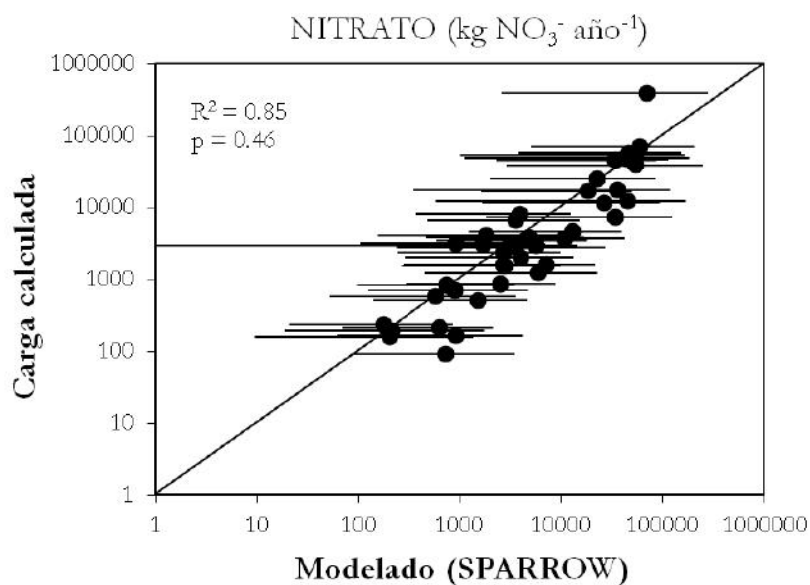


Las barras representan la incertidumbre calculada por el método bootstrap

TABLA 34. VALORES DE LOS PARÁMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL NITRATO, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO

NITRATOS	Parametric	SD	Bootstrapped	SD	Cl_low	Cl_high
URBANO (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	1706.45	2508.85	844.12	4130.52	0.001	3412.90
ALTURA (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	333.85	166.34	365.75	136.63	44.35	567.16
PRADOS (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	271.03	196.57	253.88	226.52	0.001	542.07
POINT_US (unitless)	0.02	0.17	-0.05	0.16	0.00	0.05
RCHDECAY_A (unitless)	0.002	0.001	0.002	0.002	0.00	0.003
RESDECAY (unitless)	3.722	5.347	3.938	2.957	-1.677	9.915
POWER_B (unitless)	-1.513	0.226	-1.448	0.258	-1.855	-0.956
Land to water delivery coeff (unitless)	0.031	0.042	0.023	0.037	0.00	0.062
R_SQUARE	0.85					
PVAL	0.46					

FIGURA 127. CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE NITRATO CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW

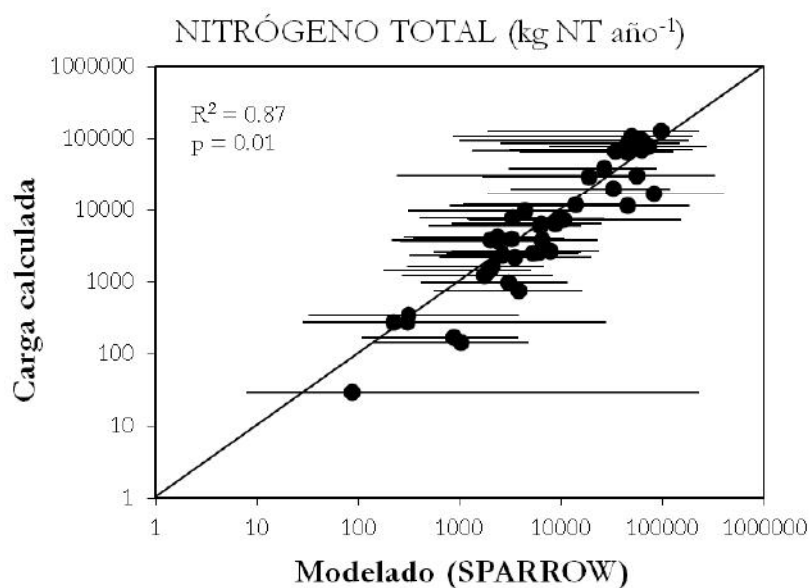


Las barras representan la incertidumbre calculada por el método bootstrap

TABLA 35. VALORES DE LOS PARÁMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA NITRÓGENO TOTAL, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO

N TOTAL	Parametric	SD	Bootstrapped	SD	Cl_low	Cl_high
URBANO (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	11866.58	7468.77	10224.53	10177.82	0.001	22323.61
ALTURA (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	314.54	119.97	248.39	346.53	0.001	539.68
PRADOS (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	667.15	315.73	429.76	898.49	0.001	1102.77
POINT_US (unitless)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RCHDECAY_A (unitless)	0.009	0.003	0.010	0.004	0.002	0.017
RESDECAY (unitless)	2.081	3.771	-3.668	19.504	-10.00	4.305
POWER_B (unitless)	0.042	0.256	0.385	0.593	-0.141	2.062
Land to water delivery coeff (unitless)	0.055	0.027	0.049	0.047	0.00	0.110
R_SQUARE	0.87					
PVAL	0.01					

FIGURA 128. CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE NITRÓGENO TOTAL CALCULADAS CON *LOADEST* Y LAS DE *SPARROW*

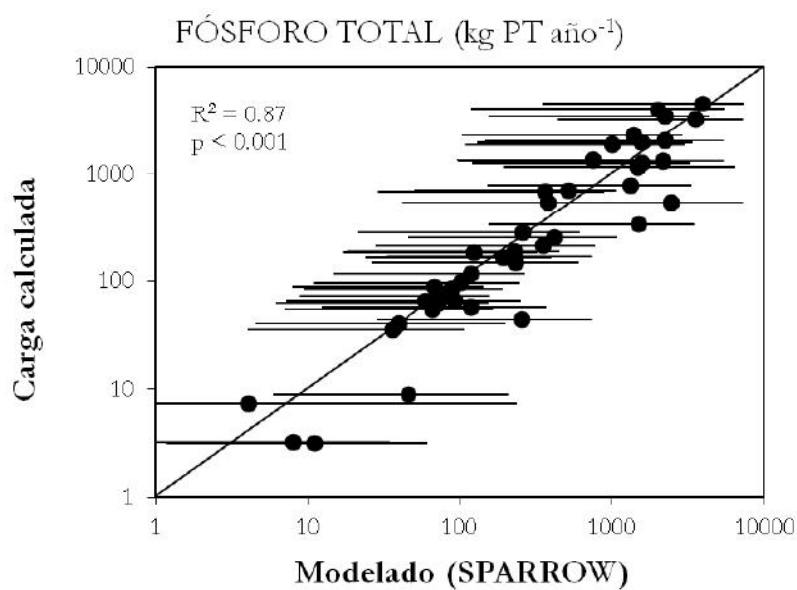


Las barras representan la incertidumbre calculada por el método bootstrap

TABLA 36. VALORES DE LOS PARÁMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL FÓSFORO TOTAL, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO

P TOTAL	Parametric	SD	Bootstrapped	SD	Cl_low	Cl_high
URBANO (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	418.47	223.19	234.05	343.09	0.001	654.23
ALTURA (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	13.56	5.23	12.56	7.52	0.001	21.77
PRADOS (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	15.08	8.68	9.79	19.38	0.001	26.97
POINT_US (unitless)	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00
RCHDECAY_A (unitless)	0.00002	0.00003	0.00	0.00	0.00	0.00003
RESDECAY (unitless)	0.544	2.242	-2.305	10.466	-8.300	0.790
POWER_B (unitless)	-1.491	0.365	-1.548	0.569	-2.916	-0.709
Land to water delivery coeff (unitless)	0.050	0.031	0.044	0.035	0.00	0.101
R_SQUARE	0.87					
PVAL	0.001					

FIGURA 129. CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE FÓSFORO TOTAL CALCULADAS CON *LOADEST* Y LAS DE *SPARROW*

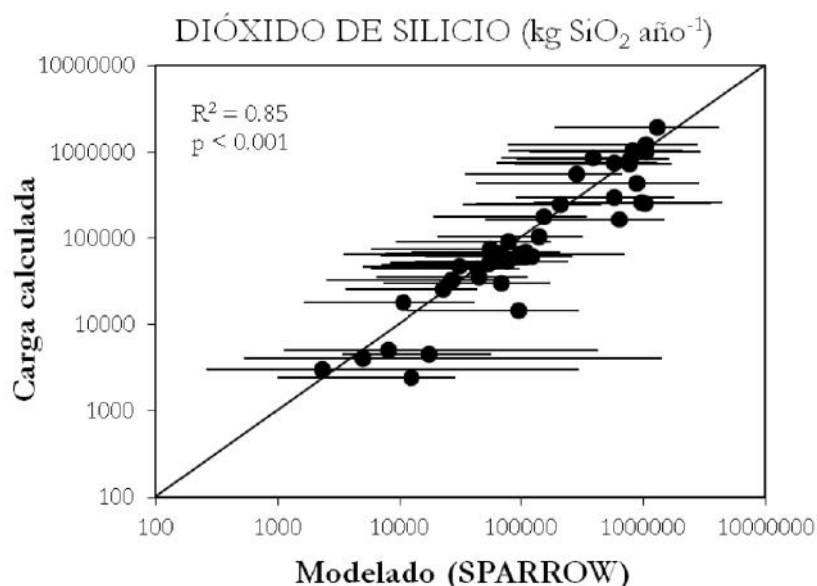


Las barras representan la incertidumbre calculada por el método bootstrap

TABLA 37. VALORES DE LOS PARÁMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL SÍLICE, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO

SiO ₂	Parametric	SD	Bootstrapped	SD	CI_low	CI_high
URBANO (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	72185.86	72848.26	39216.49	64358.62	0.001	144371.72
ALTURA (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	5179.10	1729.64	4586.43	2208.91	0.001	7543.26
PRADOS (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	9885.77	4527.10	7413.59	8249.50	0.001	14258.60
POINT_US (unitless)	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00
RCHDECAY_A (unitless)	0.006	0.002	0.004	0.005	0.00	0.008
RESDECAY (unitless)	8.032	7.563	-8.683	29.244	-10.00	18.535
POWER_B (unitless)	0.009	0.204	0.032	0.427	-0.616	0.595
Land to water delivery coeff (unitless)	0.049	0.029	0.051	0.032	0.00	0.098
R_SQUARE	0.85					
PVAL	0.00007					

FIGURA 130. CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE SÍLICE CALCULADAS CON *LOADEST* Y LAS DE *SPARROW*



Las barras representan la incertidumbre calculada por el método bootstrap

4.4. EVALUACIÓN DE LOS APORTES DIFUSOS Y PUNTUALES

A continuación, se presentan los resultados del modelado de cargas con SPARROW. Este apartado está estructurado de acuerdo a los 10 compuestos con los que ha trabajado el modelo. En ellos, se muestran tanto las cargas totales en los cauces (que se acumulan aguas abajo) como las cargas incrementales por cada subcuenca, es decir, las cargas que soportan los cauces que han sido generadas estrictamente dentro de cada subcuenca. Esta misma información se da también distinguiendo entre los tres aportes difusos incluidos en el modelo: *URBANO*, *PRADOS* y *ALTURA*, lo que permite diferenciar la importancia de cada origen en la carga total.

4.4.1. Modelo para el amonio

El modelado de las cargas de amonio con **SPARROW** muestra un patrón bastante marcado, según el cual éstas aumentan lo largo del cauce principal y, especialmente, en las subcuencas con presencia de núcleos urbanos (Figuras 131 y 132). En los cauces secundarios sin núcleos urbanos, destacan los aportes de las cuencas del río Umbría y la cabecera del arroyo Santa Ana. El patrón temporal es de un aumento progresivo a lo largo del período de estudio. Los mayores incrementos se registran en la subcuenca de la depuradora, seguidos de los del núcleo de Rascafría y la urbanización Los Grifos.

Respecto a las cargas asociadas a los usos del suelo, en primer lugar la categoría **ALTURA** muestra que las cargas de amonio asociadas a ésta solo son significativas durante los periodos 2 y 3 (Figura 133). Las subcuencas que registran mayores incrementos son las del río Umbría y la cabecera del arroyo Santa Ana (Figura 134).

En cuanto a la categoría **PRADOS**, las subcuencas con mayor importancia se concentran en la parte media de la cuenca (Figura 135), registrándose los mayores incrementos en el arroyo del Villar y el río Pinilla, así como en la zona del arroyo Santa Ana (Figura 136).

Por último, en la categoría **URBANO** destaca la influencia que tienen las cargas de Valdesquí a lo largo del cauce principal (Figura 137), así como el marcado incremento que se produce en los municipios de Rascafría, la urbanización Los Grifos y Lozoya (Figura 138).

FIGURA 131. CARGA TOTAL DE AMONIO MODELADA CON SPARROW

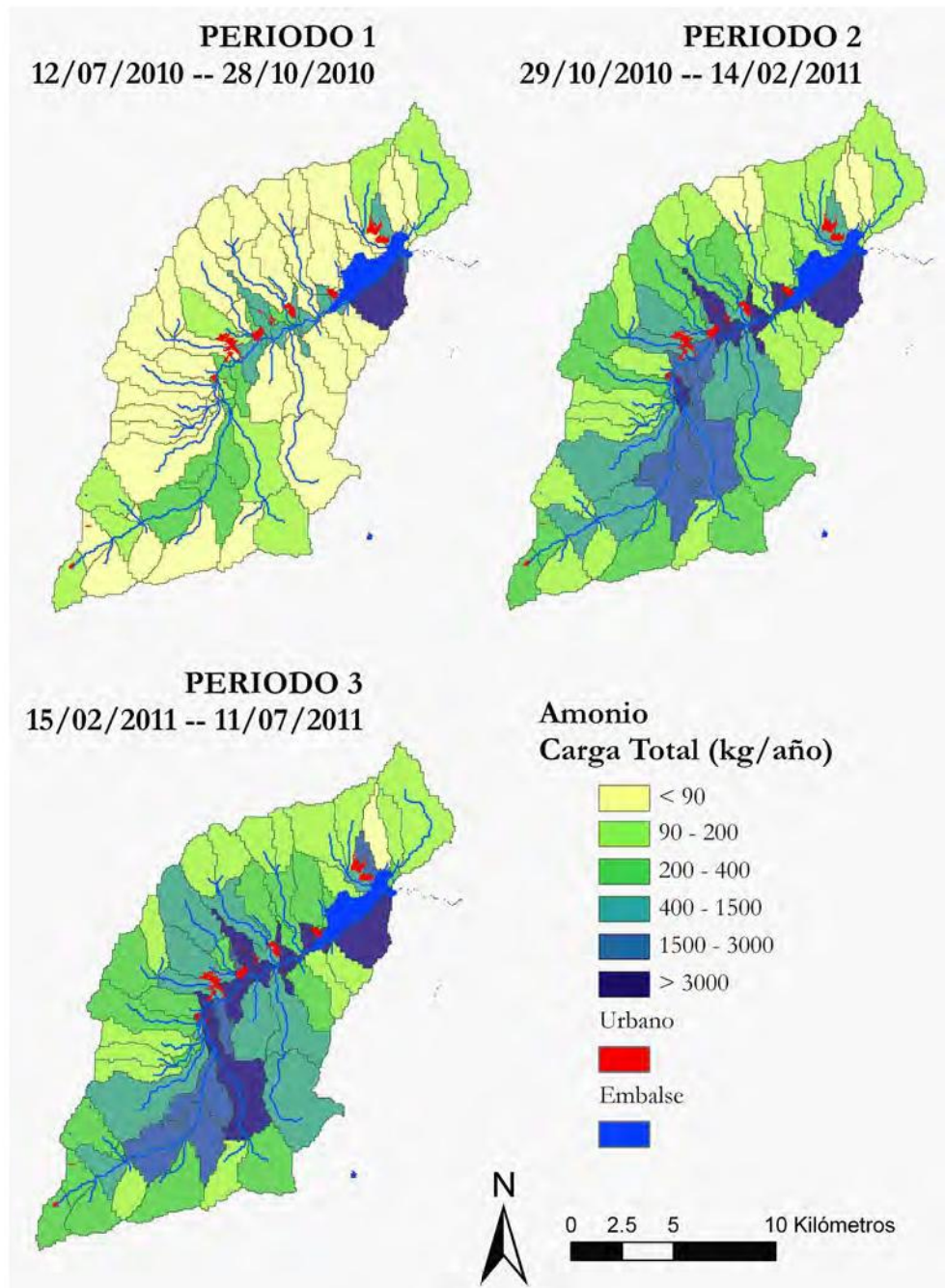


FIGURA 132. CARGA INCREMENTAL DE AMONIO MODELADA CON SPARROW

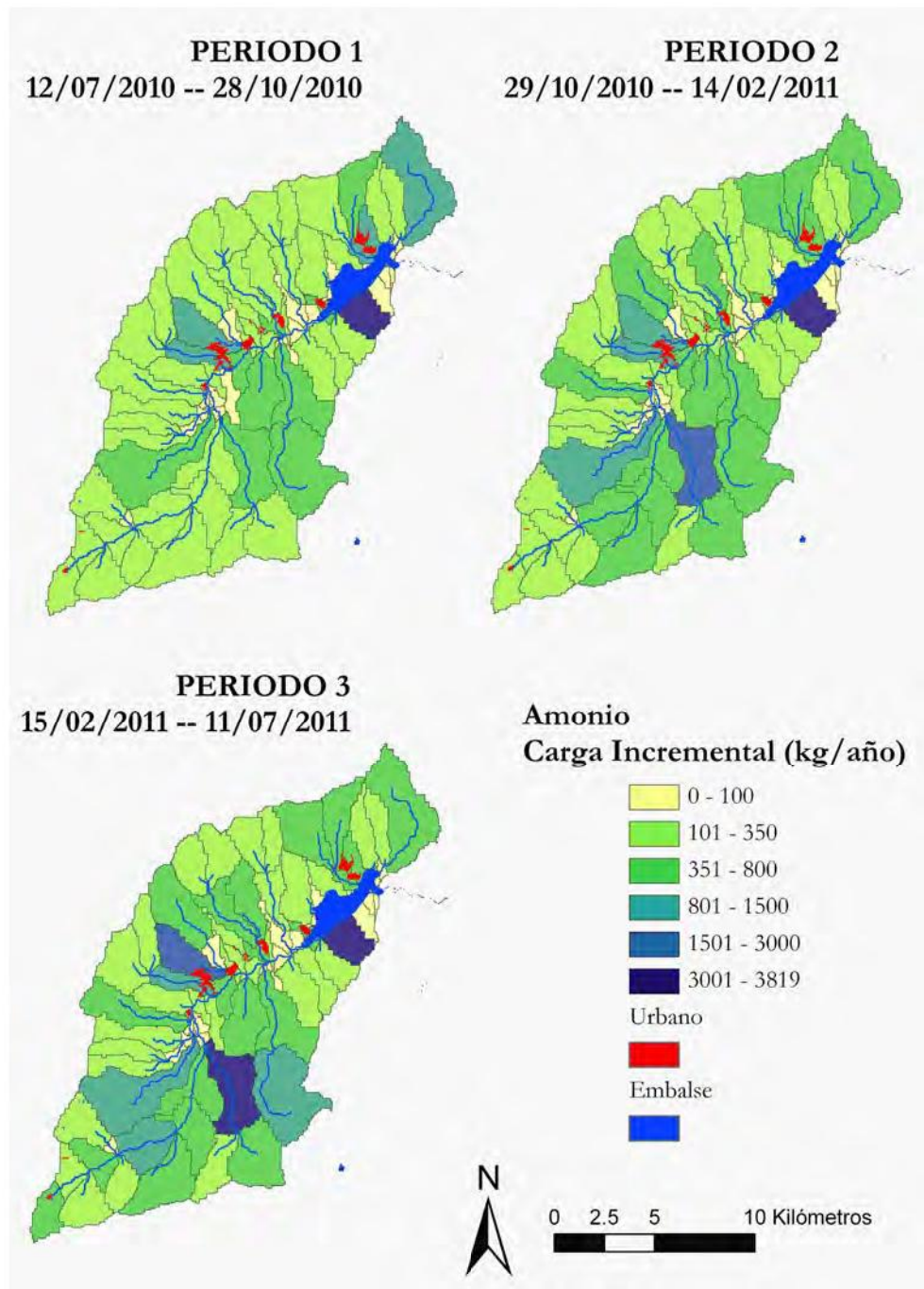


FIGURA 133. CARGA TOTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

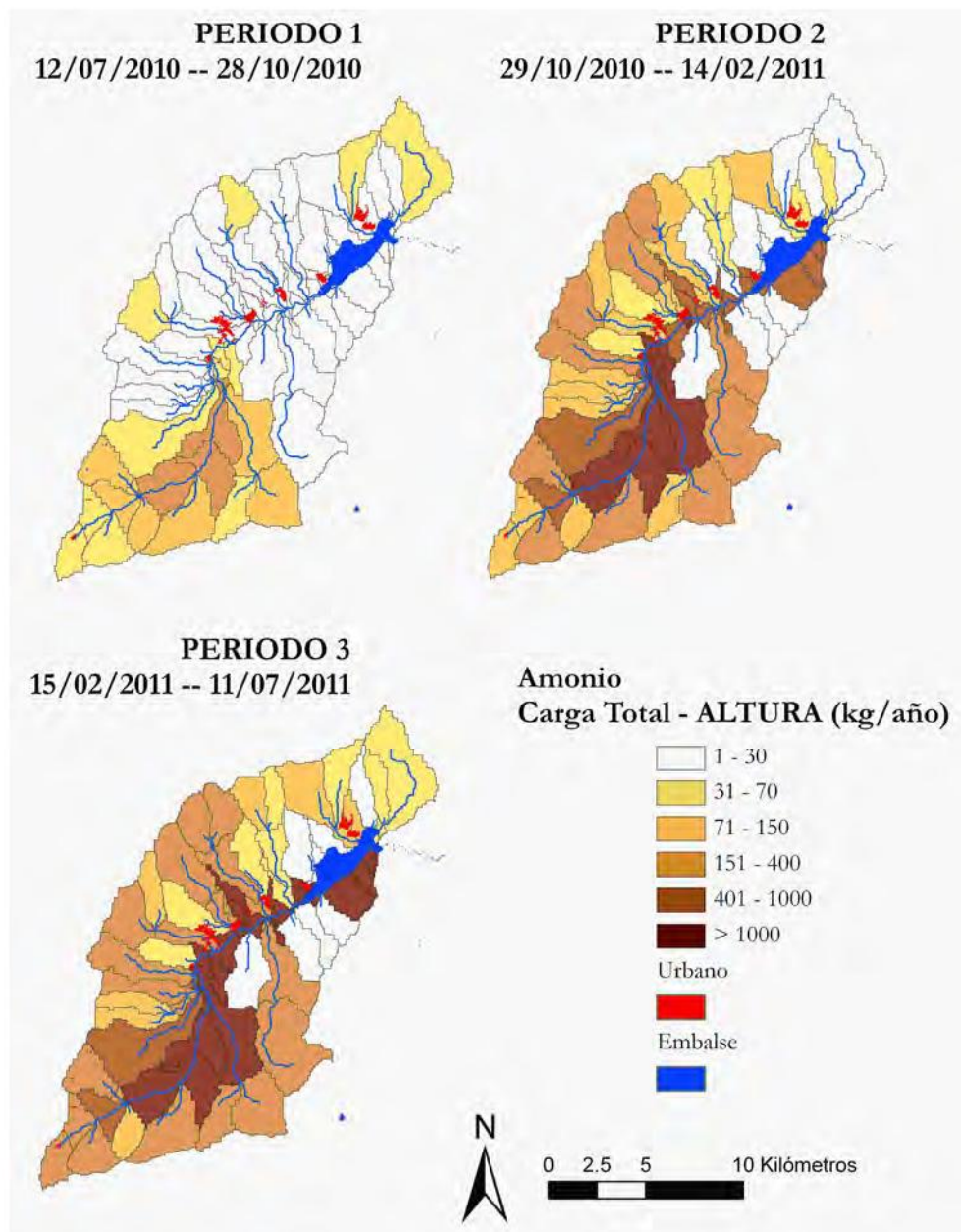


FIGURA 134. CARGA INCREMENTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

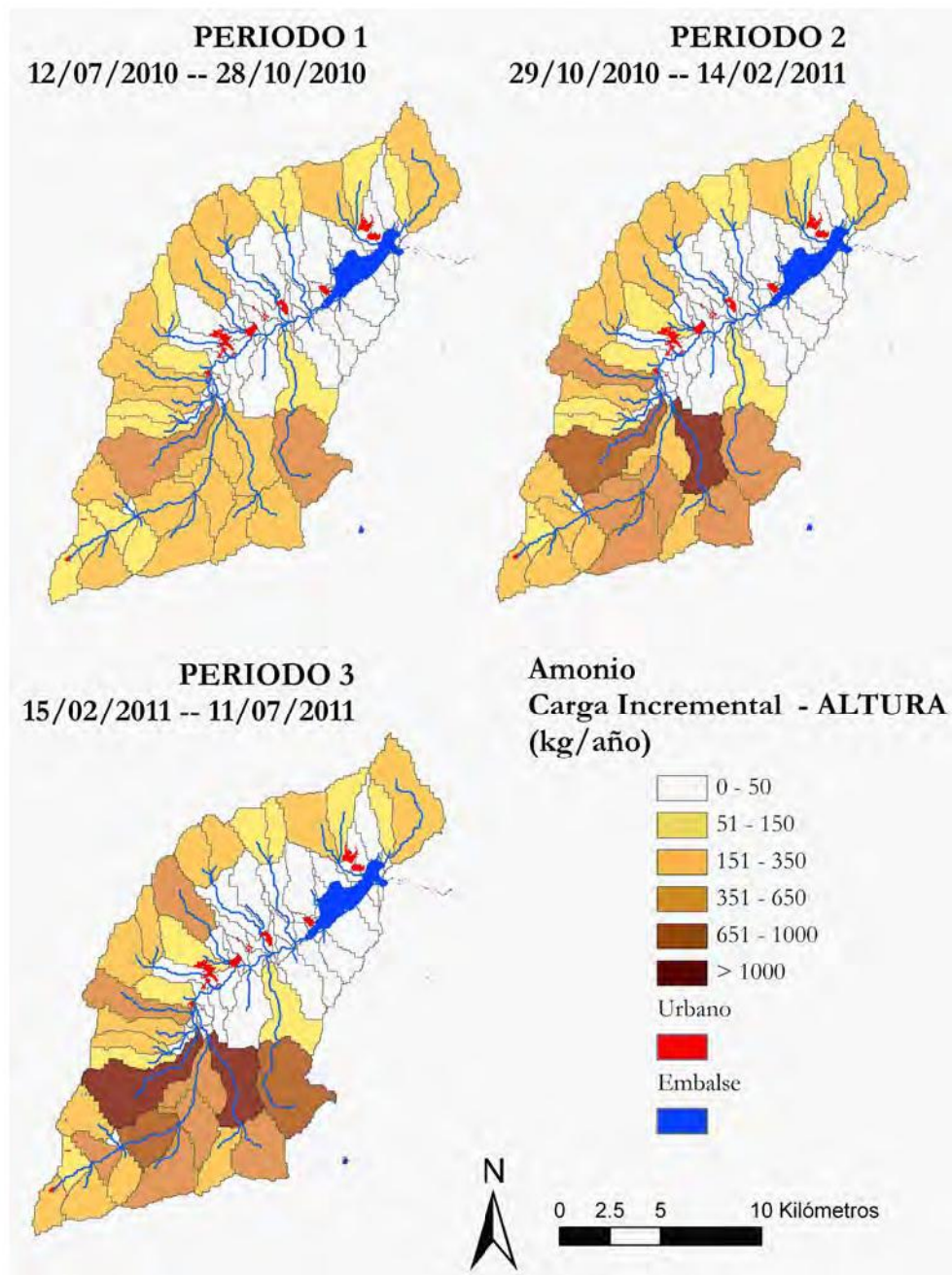


FIGURA 135. CARGA TOTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

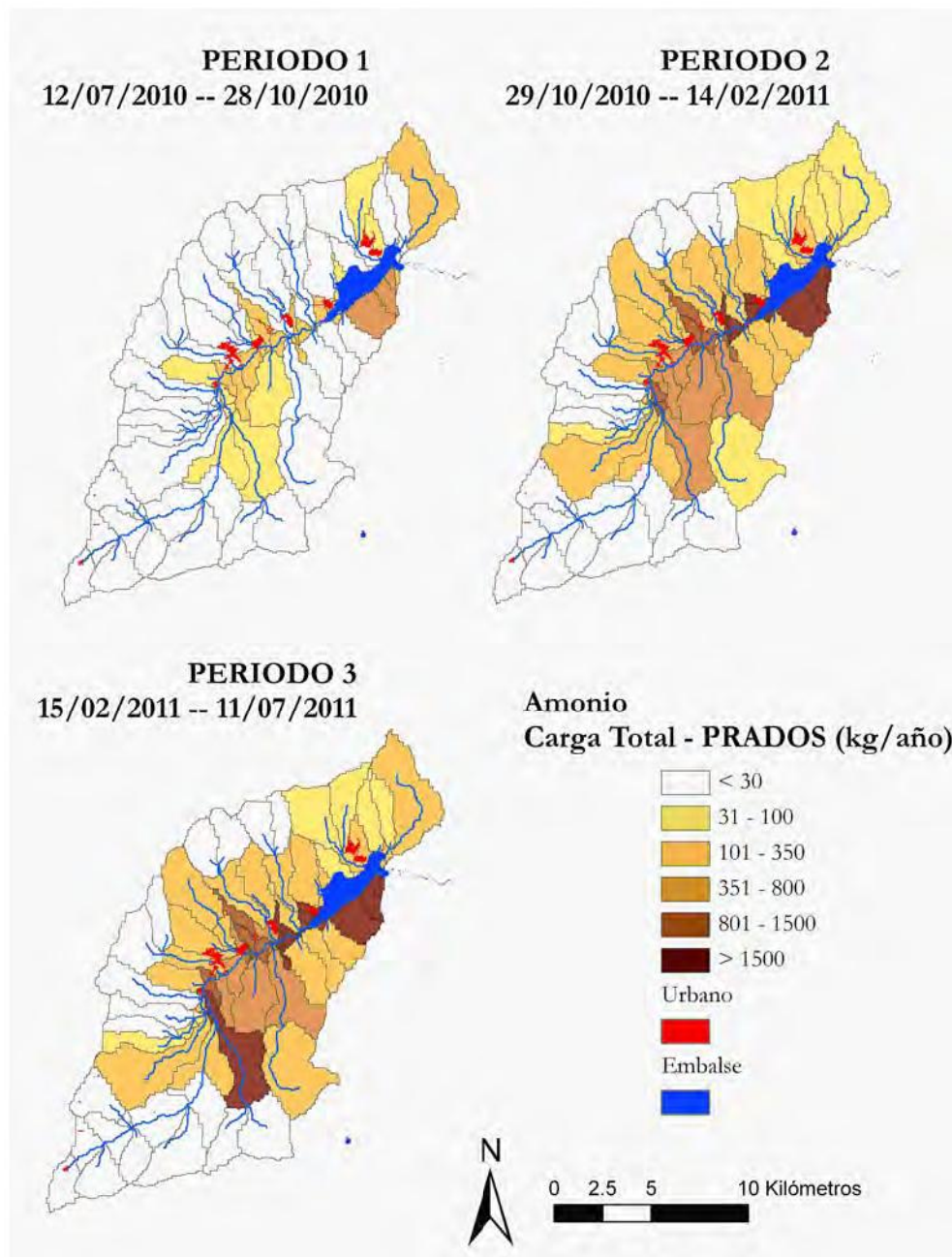


FIGURA 136. CARGA INCREMENTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

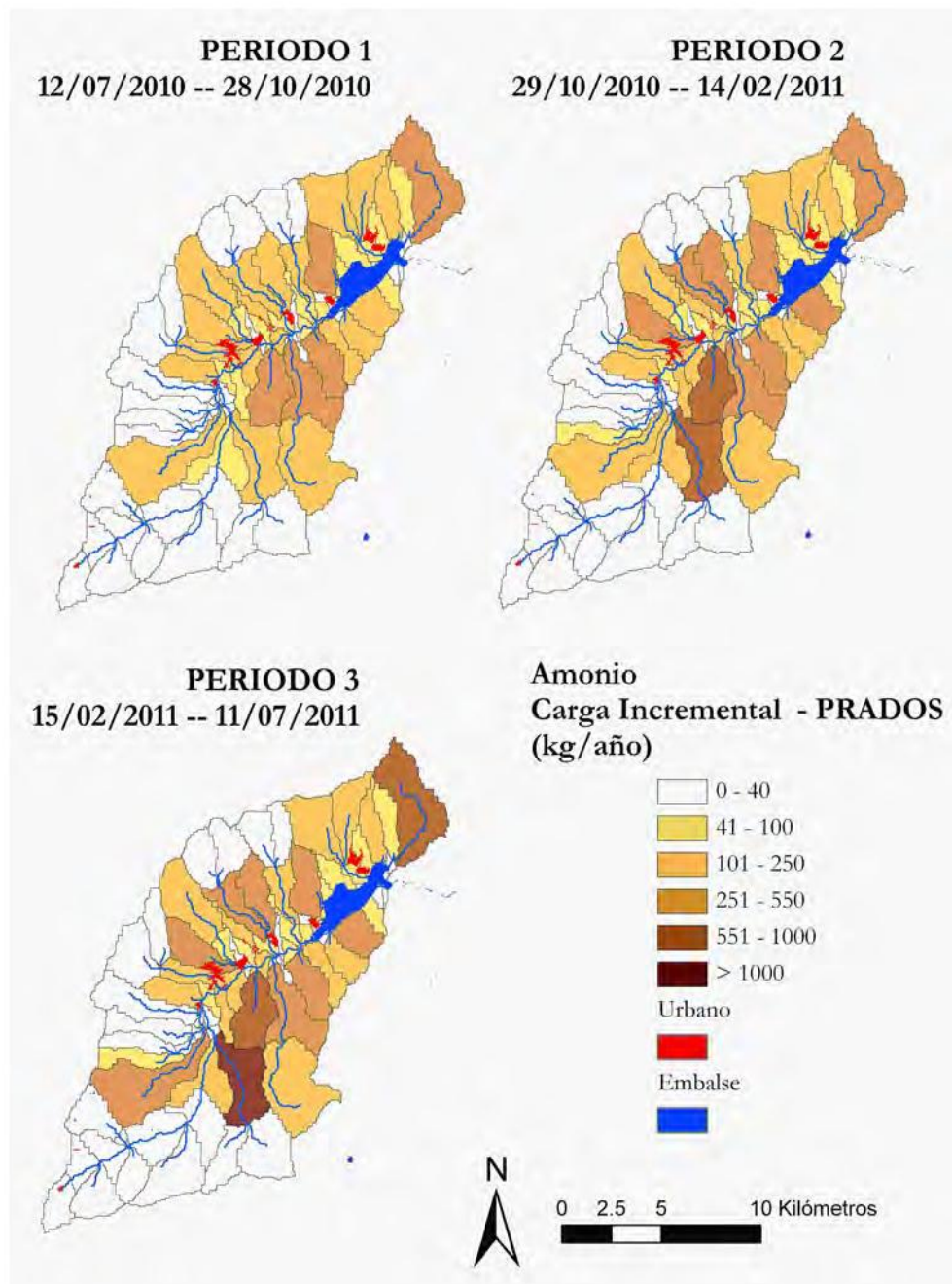


FIGURA 137. CARGA TOTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA *URBANO* DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

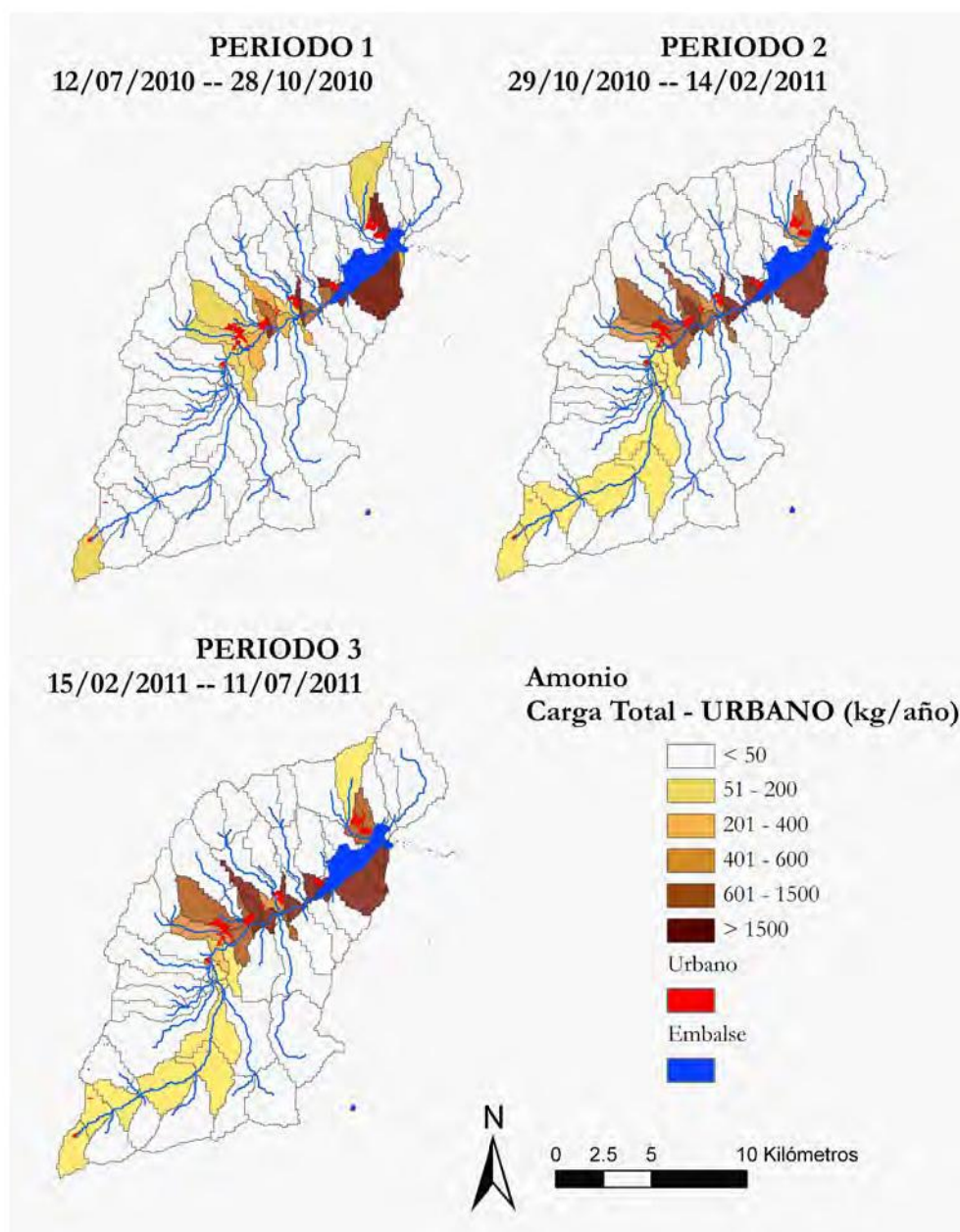
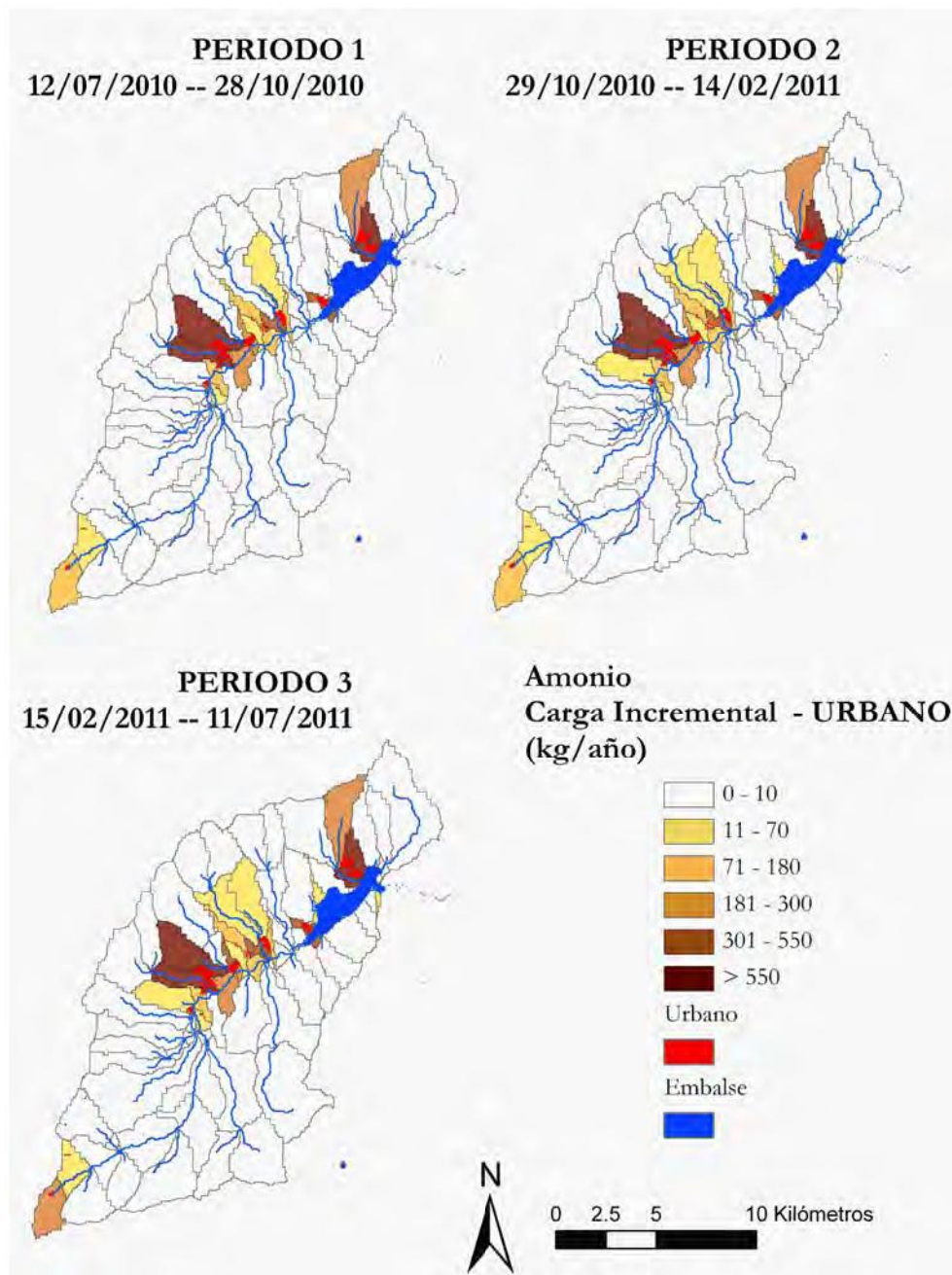


FIGURA 138. CARGA INCREMENTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW



4.4.2. Modelo para carbono particulado

Los resultados del modelado de las cargas de carbono particulado con *SPARROW* ofrecen un patrón total similar a las del Amonio, con un aumento a lo largo del cauce principal (Figura 139). Sin embargo, los incrementos se producen en las partes medias de la cuenca (Figura 140) con un destacado papel de los arroyos del Villar y de Santa Ana, así como del río Umbría.

Los resultados de la categoría *ALTURA* de usos del suelo, para las cargas de carbono particulado muestran la importancia de los aportes de la subcuencas del río Umbría, así como las del entorno del área "La Isla" y la cabecera del arroyo de Santa Ana (Figuras 141 y 142).

En la categoría *PRADOS*, por su parte, destaca el incremento de la carga de carbono particulado que se produce en el arroyo del Villar, así como las del arroyo de Roblezo de Arriba, afluente del arroyo de Santa Ana (Figura 144). En las zonas medias, tanto de la margen derecha como de la izquierda, los incrementos se mantienen bastante constantes a lo largo del año.

En cuanto a las cargas de carbono particulado asociadas a uso *URBANO*, su importancia es más discreta, (Figura 145), aunque los núcleos de Rascafría, la urbanización Los Grifos, y Lozoya vuelven a sufrir un importante incremento (Figura 146).

FIGURA 139. CARGA TOTAL DE CARBONO PARTICULADO MODELADA CON SPARROW

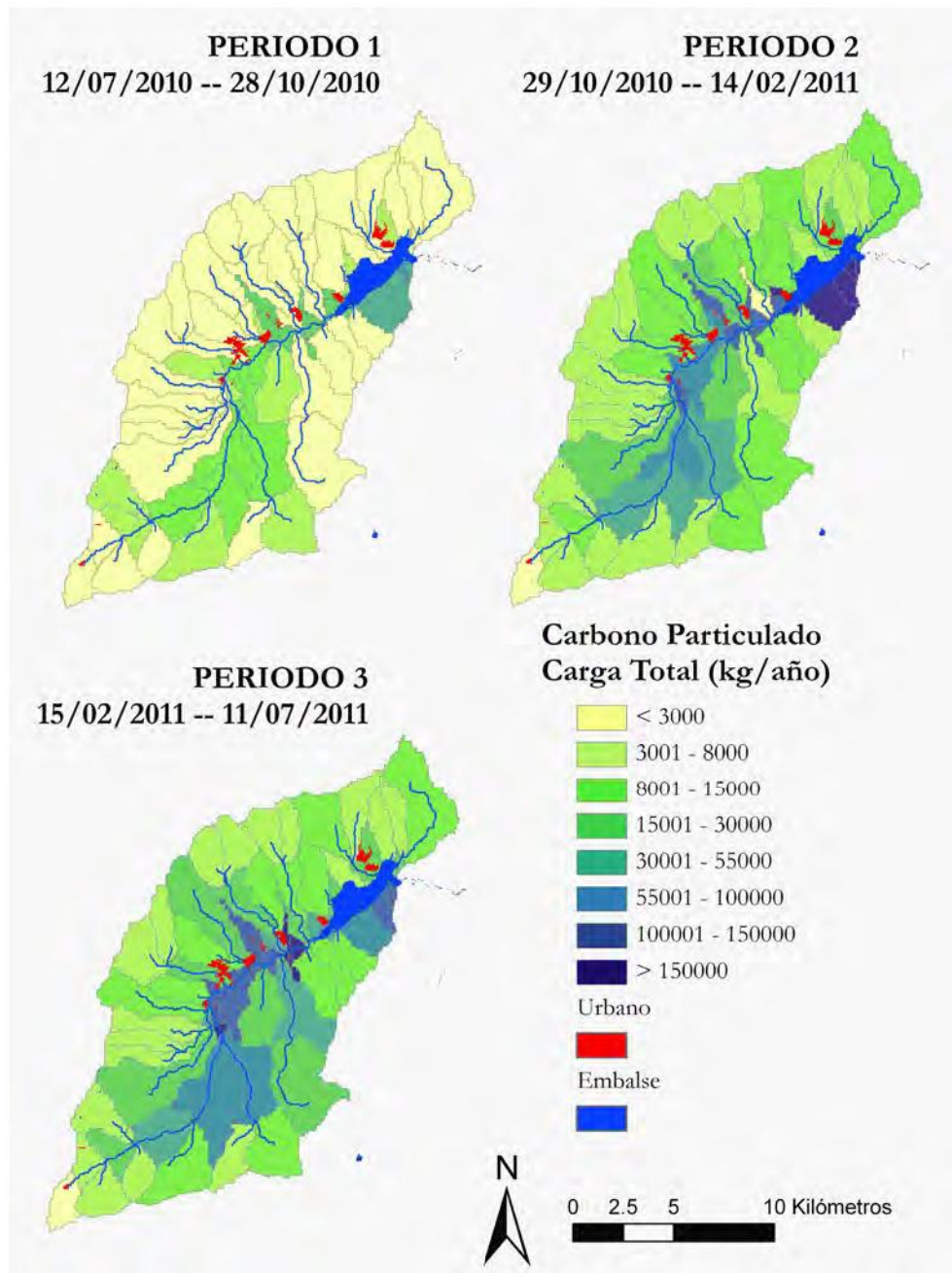


FIGURA 140. CARGA INCREMENTAL DE CARBONO PARTICULADO MODELADA CON SPARROW

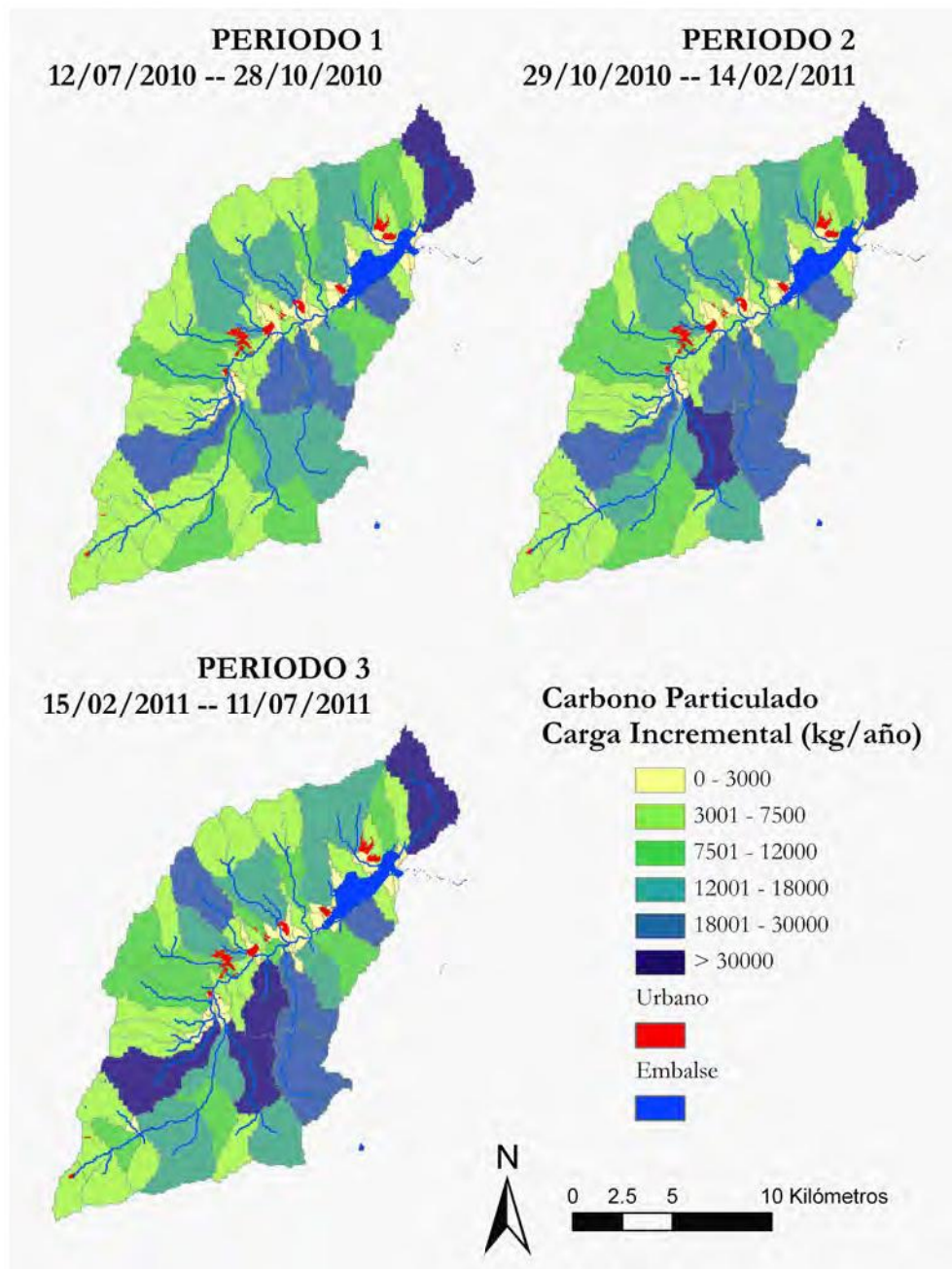


FIGURA 141. CARGA TOTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DE SUELO, MODELADA CON SPARROW

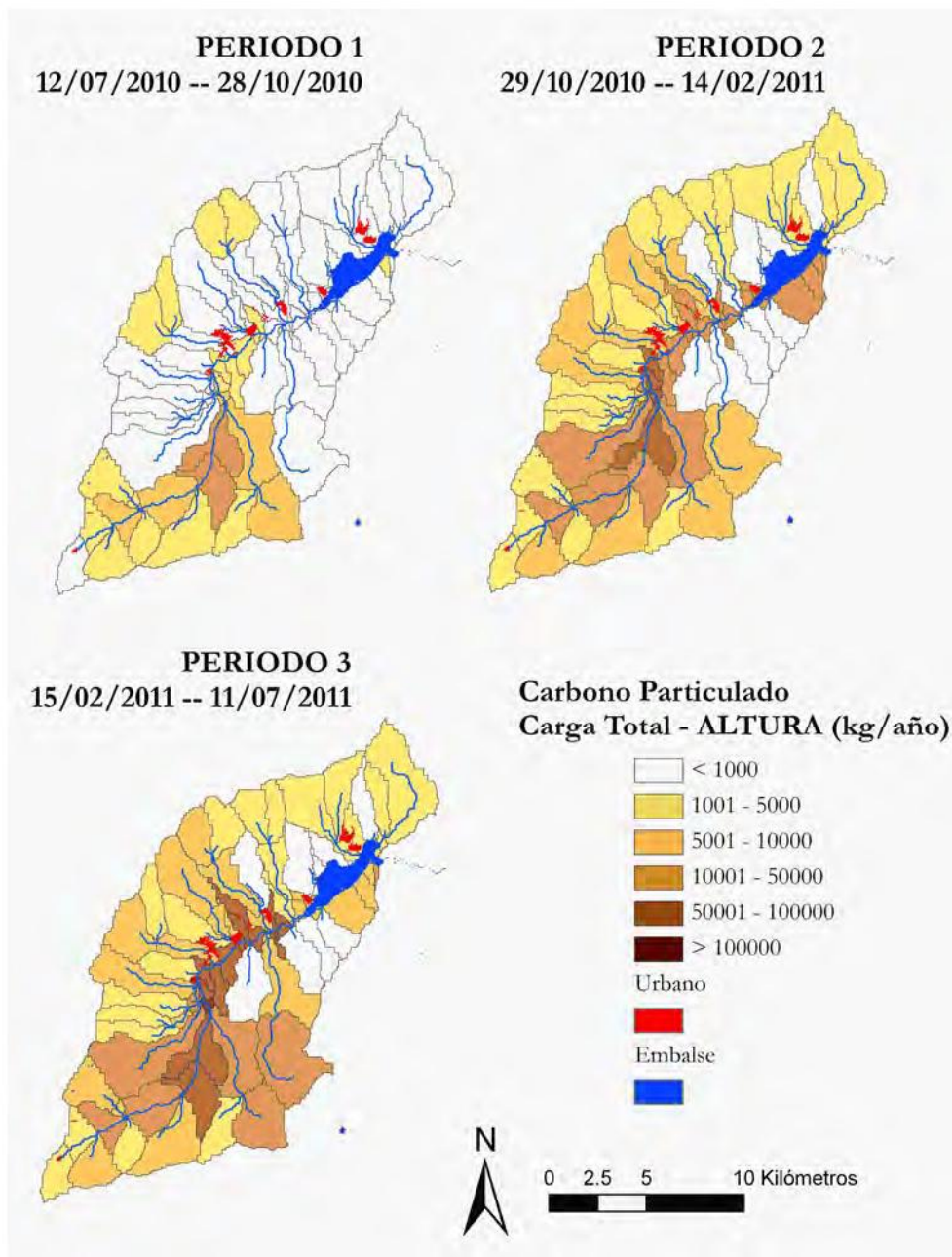


FIGURA 142. CARGA INCREMENTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DE SUELO, MODELADA CON SPARROW

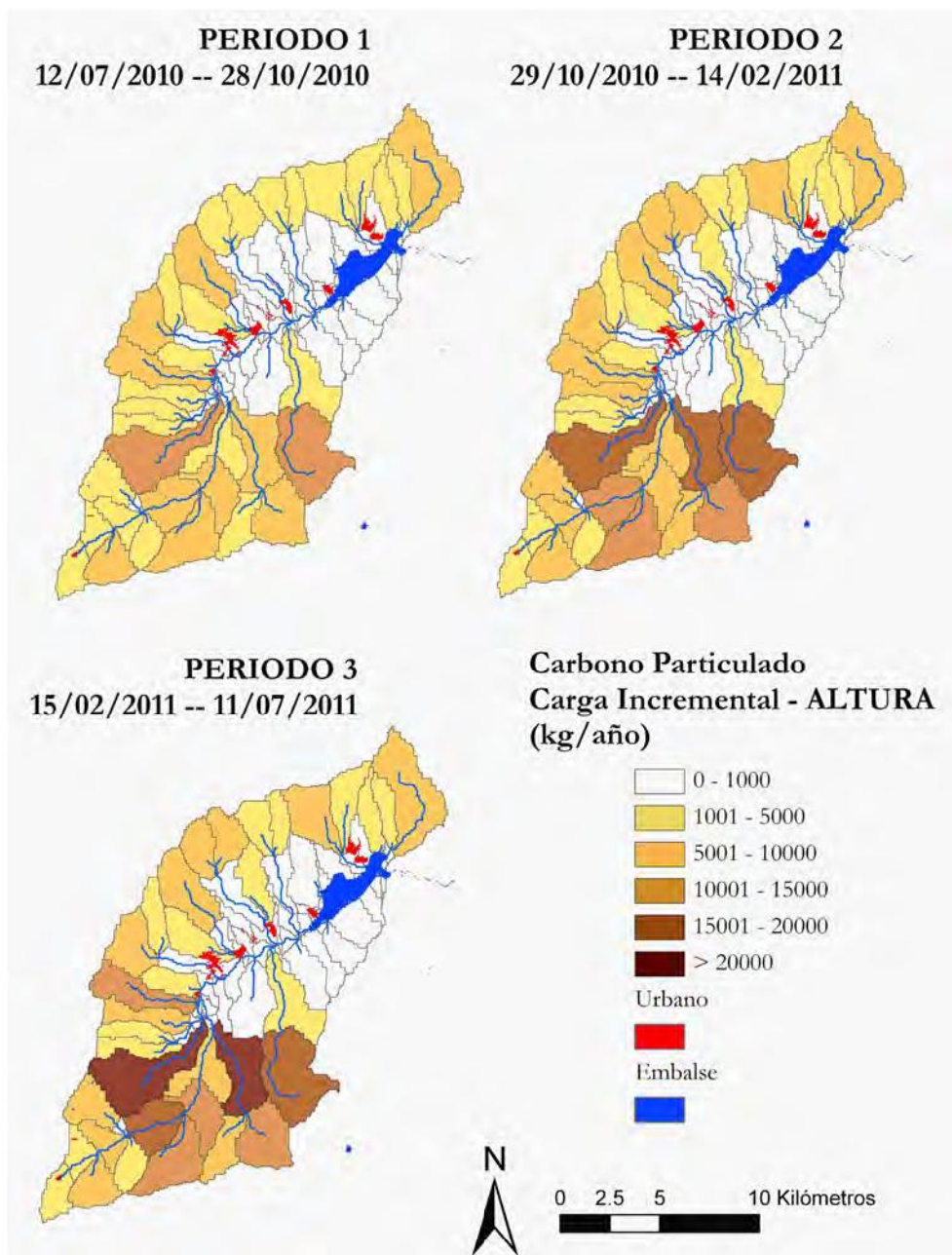


FIGURA 143. CARGA TOTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DE SUELO, MODELADA CON SPARROW

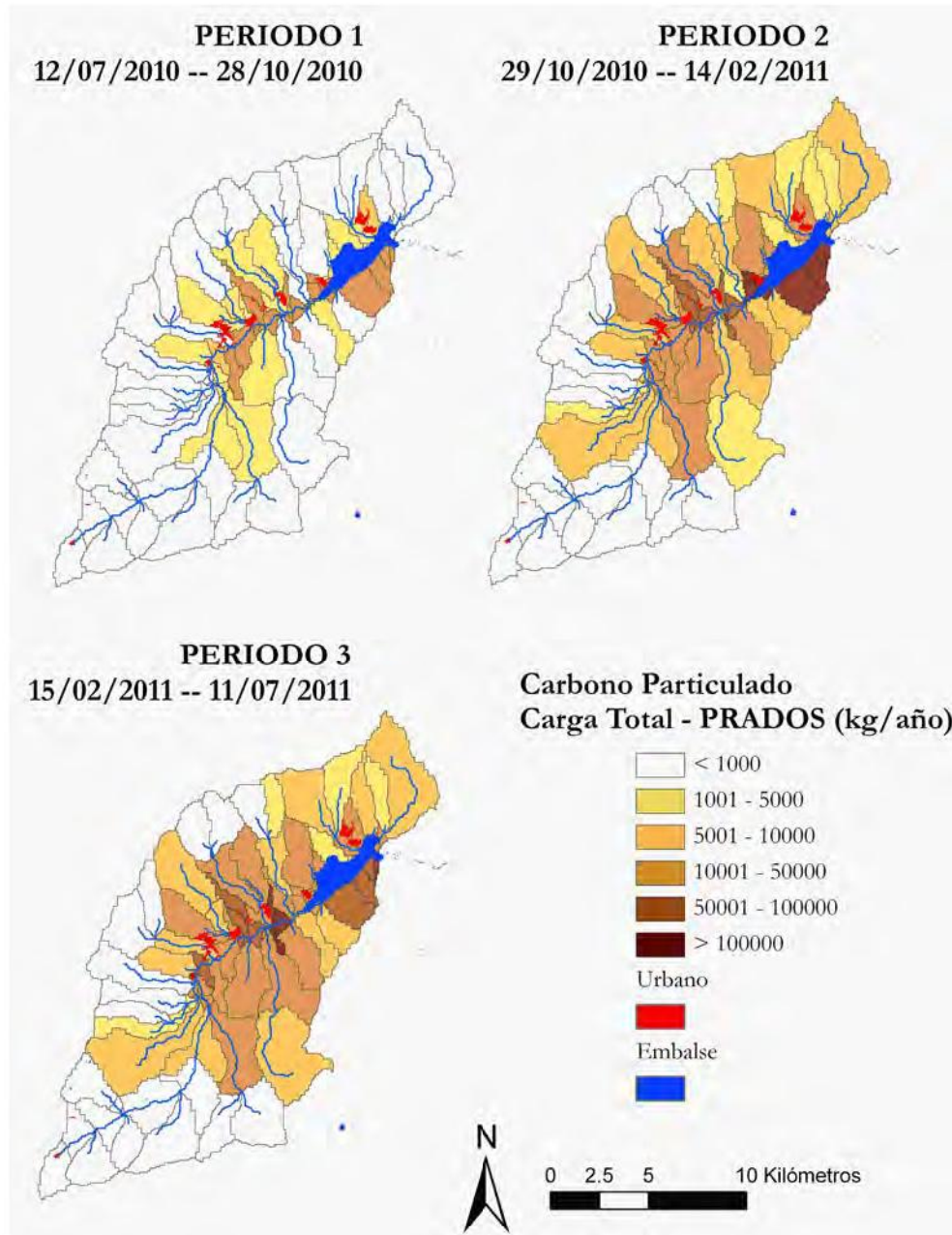


FIGURA 144. CARGA INCREMENTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DE SUELO, MODELADA CON SPARROW

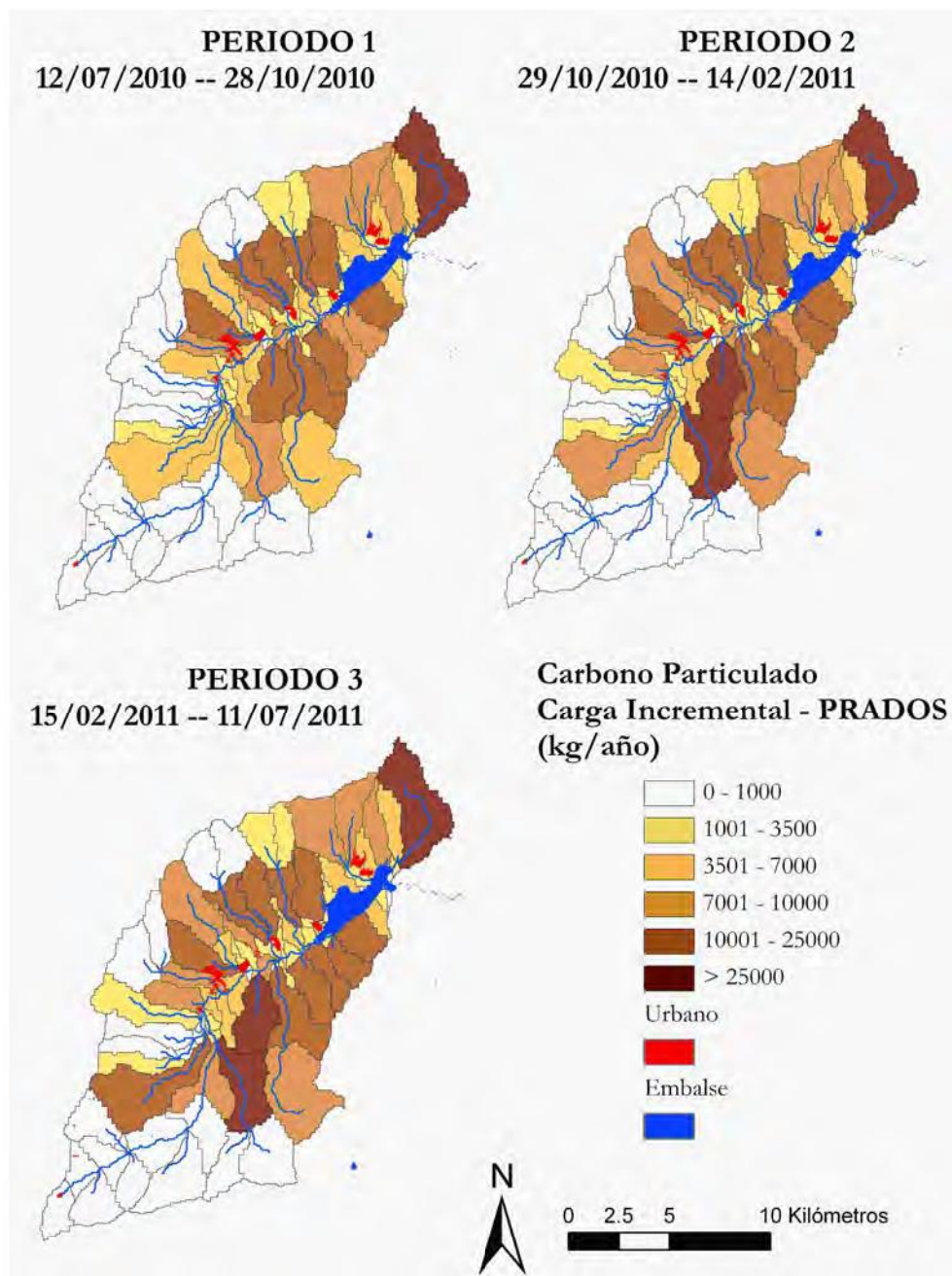


FIGURA 145. CARGA TOTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DE SUELO, MODELADA CON SPARROW

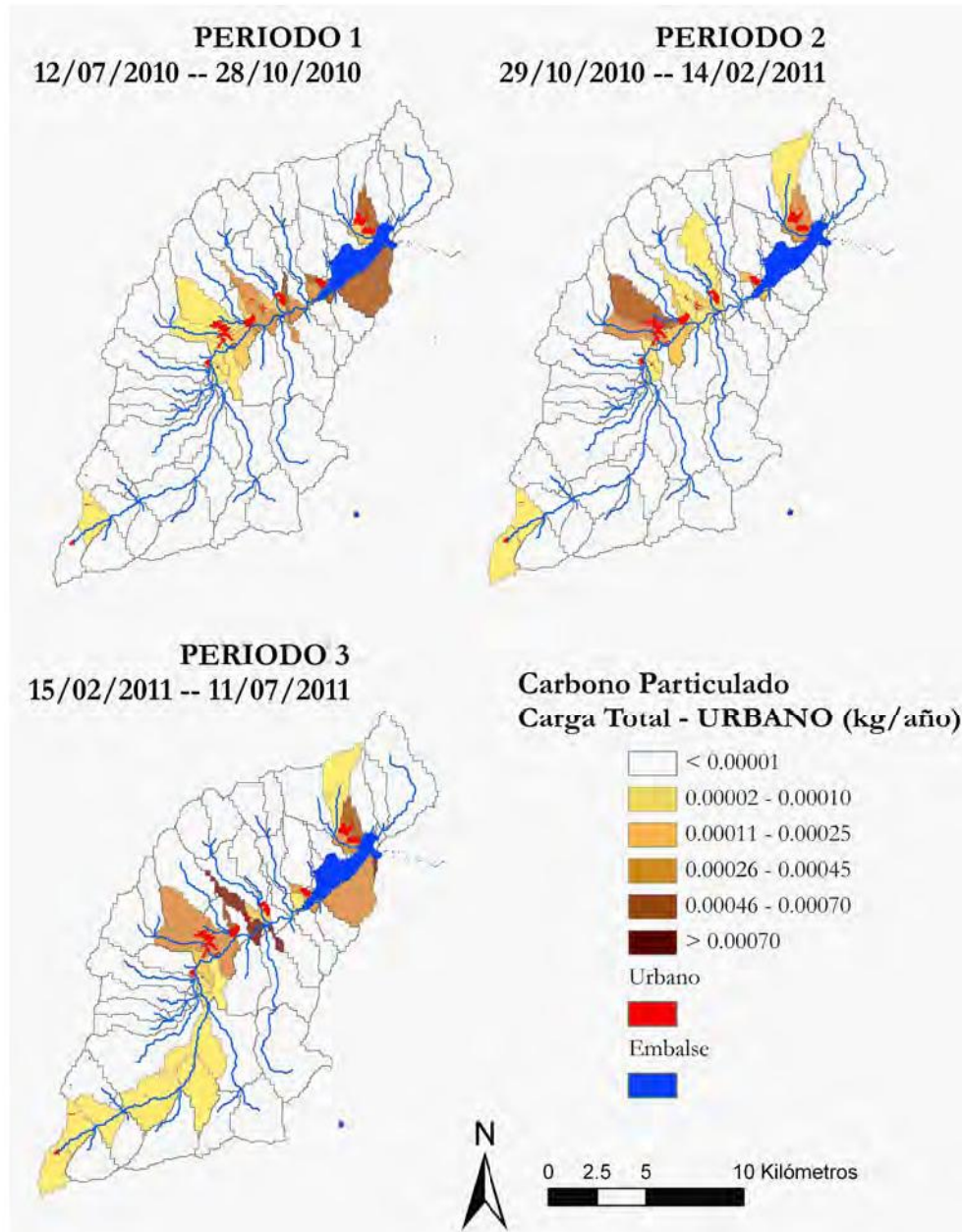
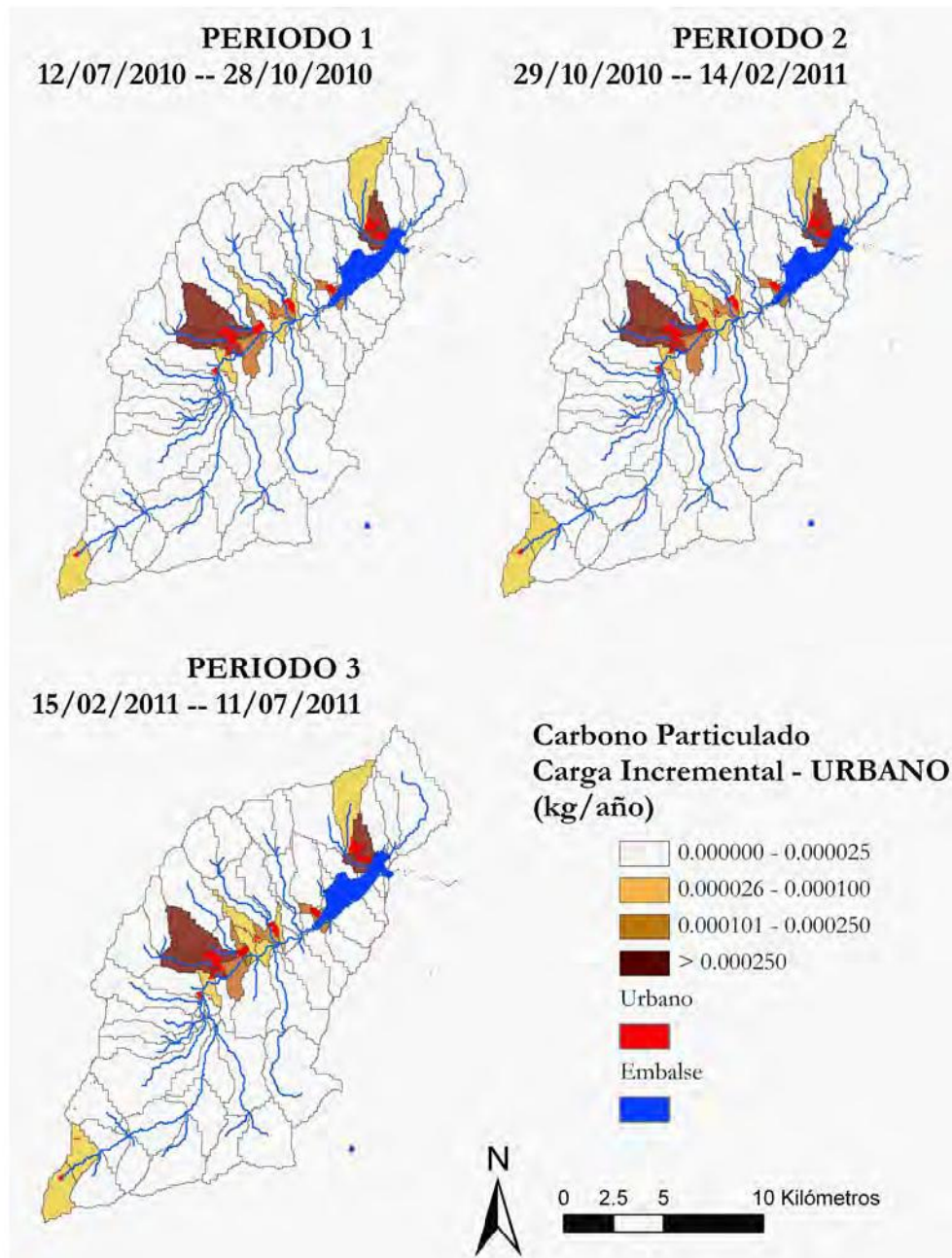


FIGURA 146. CARGA INCREMENTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DE SUELO, MODELADA CON SPARROW



4.4.3. Modelo para carbono orgánico disuelto (DOC)

Las cargas de DOC modeladas con SPARROW se concentran con claridad a lo largo del cauce principal (Figura 147), si bien los incrementos más significativos se observan en las subcuencas medias, especialmente en la margen derecha del Lozoya, pero también en el río Umbría, y los arroyos del Villar, del Gallinero (Los Grifos) y del Paular (Figura 148).

La categoría de usos del suelo **ALTURA** indica que las cargas de DOC asociadas no son muy marcadas (Figura 149), siendo la subcuenca del río Umbría (Figura 150) en la que se produce un mayor incremento, seguida de las subcuencas periféricas a “la Isla”, el arroyo de Santa Ana, y el arroyo de El Paular.

Las cargas de DOC asociadas a la categoría **PRADOS** apenas tienen importancia durante el periodo 1, y no son especialmente elevadas en los periodos 2 y 3 (Figura 151).

Entre las subcuencas de la parte media que experimentan un mayor incremento destacan los arroyos del Villar y el de Santa Ana (Figura 152).

En la categoría **URBANO**, de nuevo lo más destacable son los incrementos en las subcuencas del arroyo del Palomar en Lozoya, el Artiñuelo en Rascafría, y el del Gallinero en la urbanización de Los Grifos.

FIGURA 147. CARGA TOTAL DE DOC MODELADA CON SPARROW

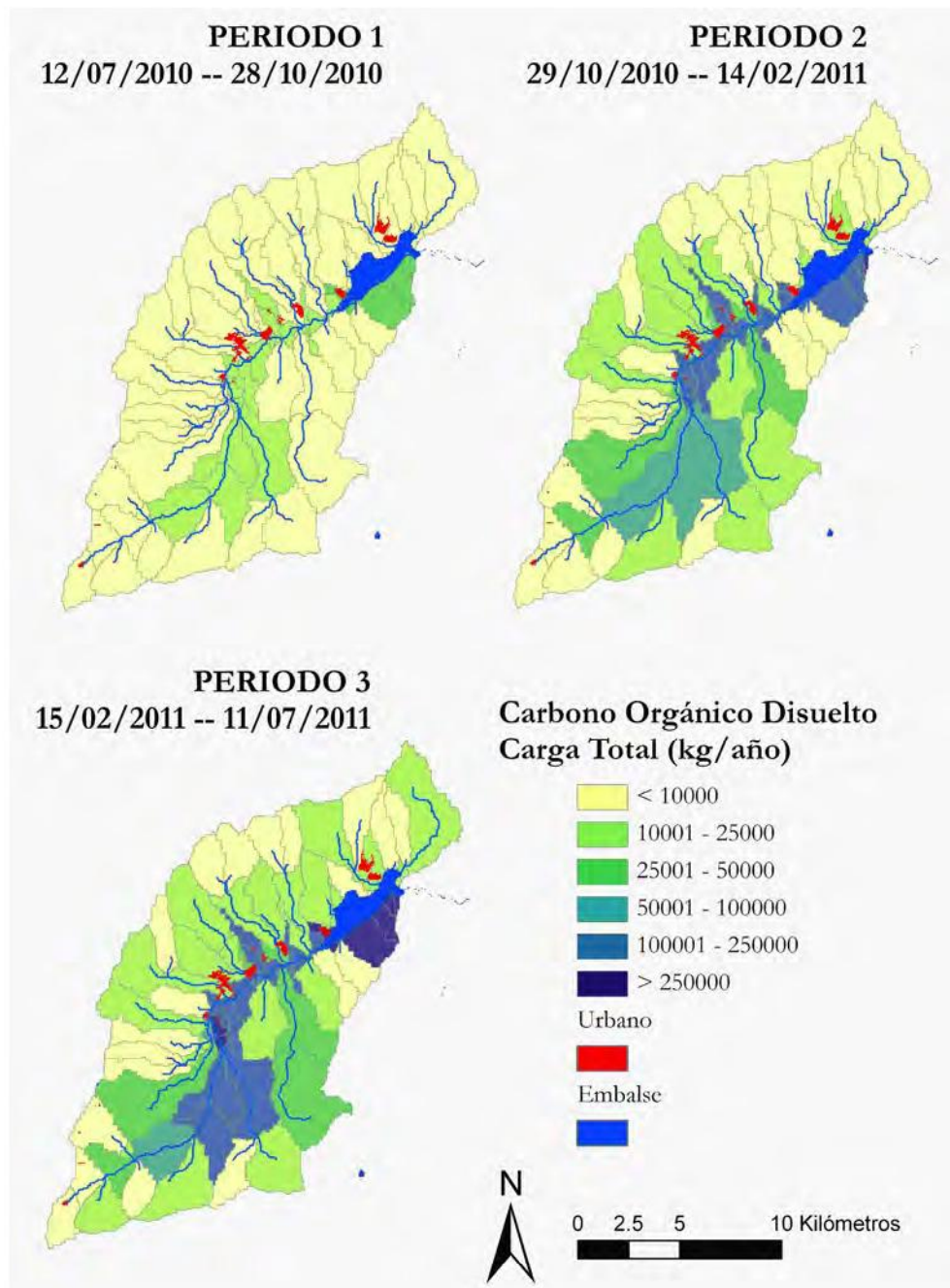


FIGURA 148. CARGA INCREMENTAL DE DOC MODELADA CON SPARROW

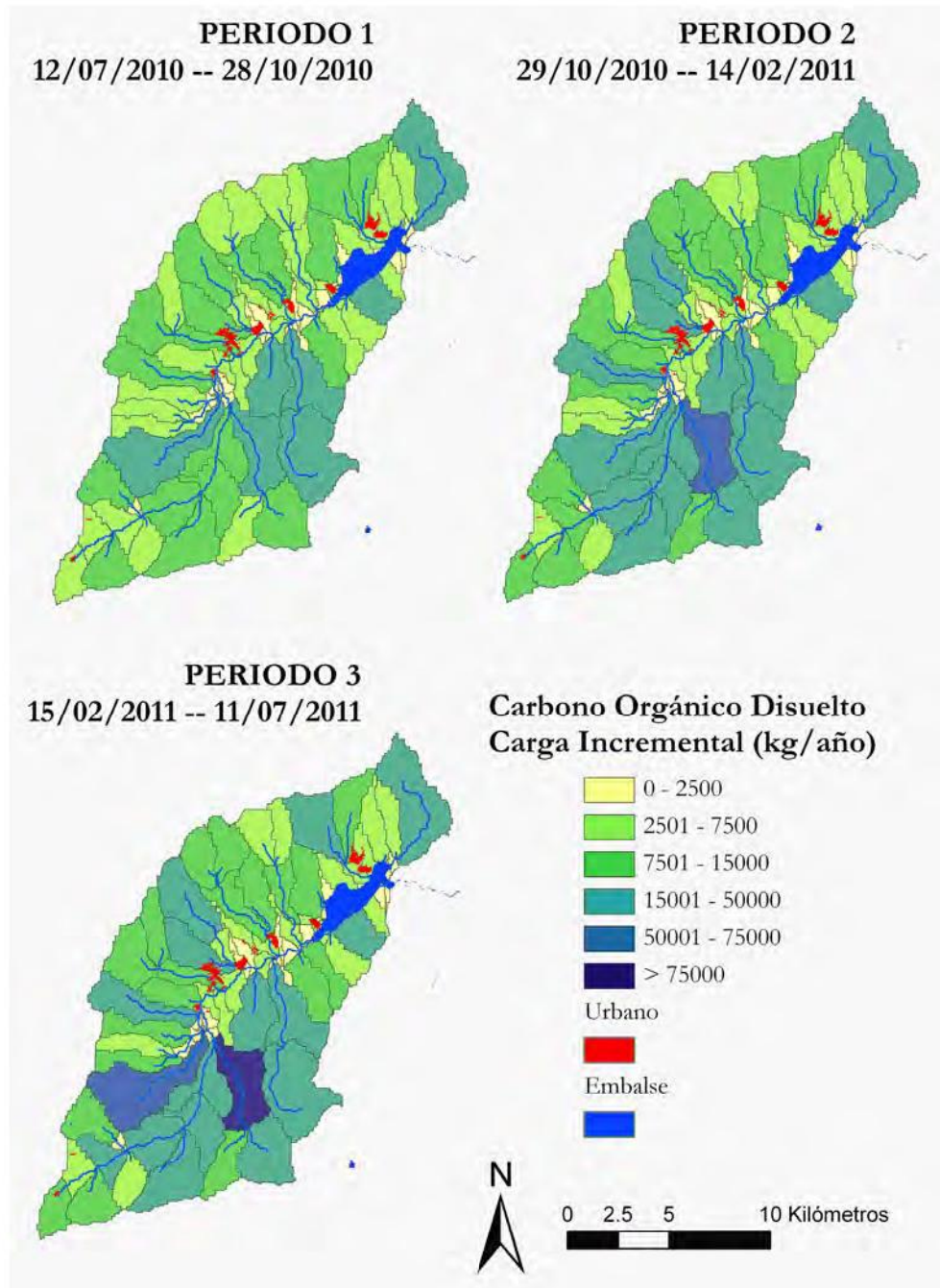


FIGURA 149. CARGA TOTAL DE DOC ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DE SUELO, MODELADA CON SPARROW

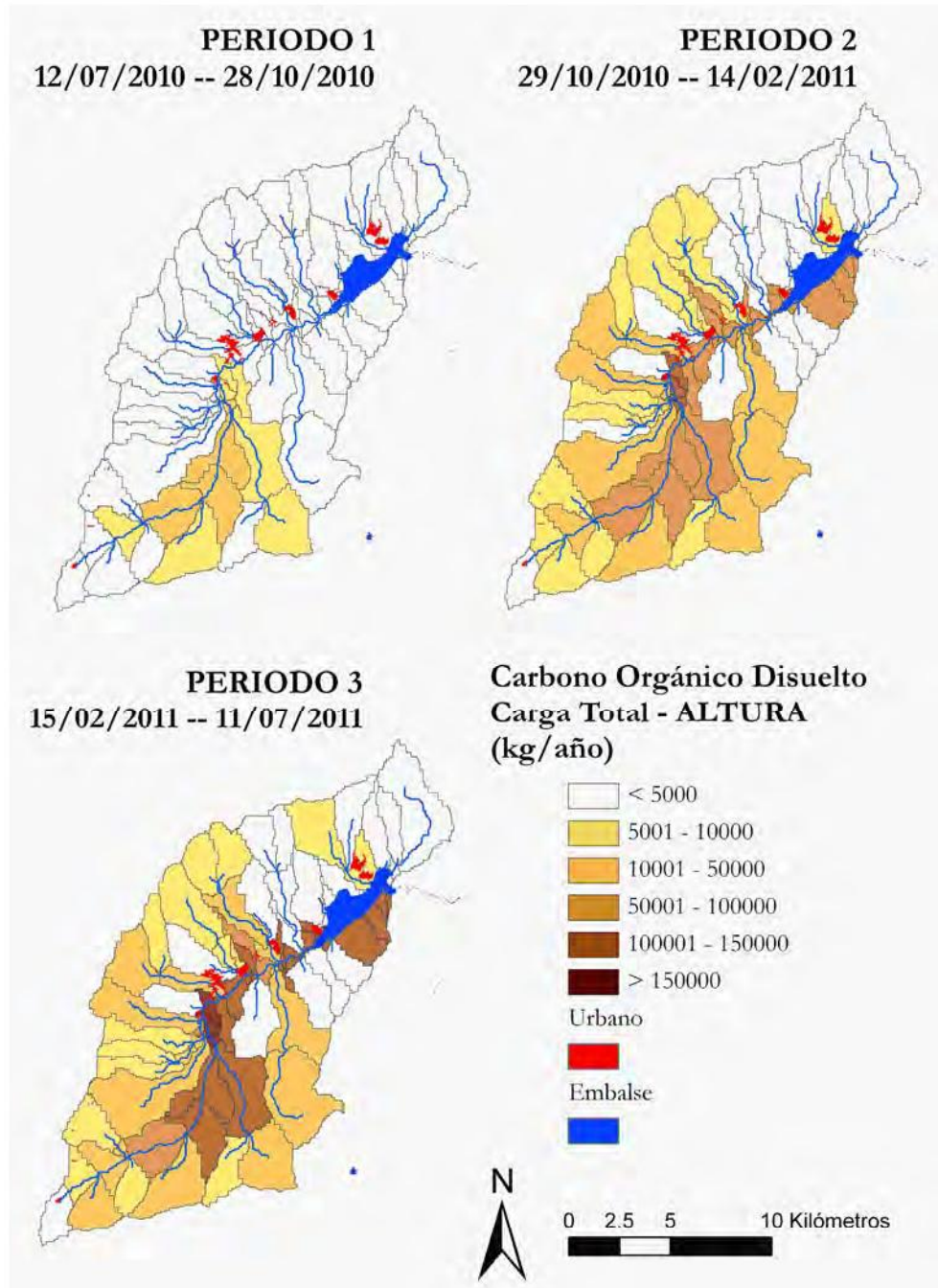


FIGURA 150. CARGA INCREMENTAL DE DOC ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DE SUELO, MODELADA CON SPARROW

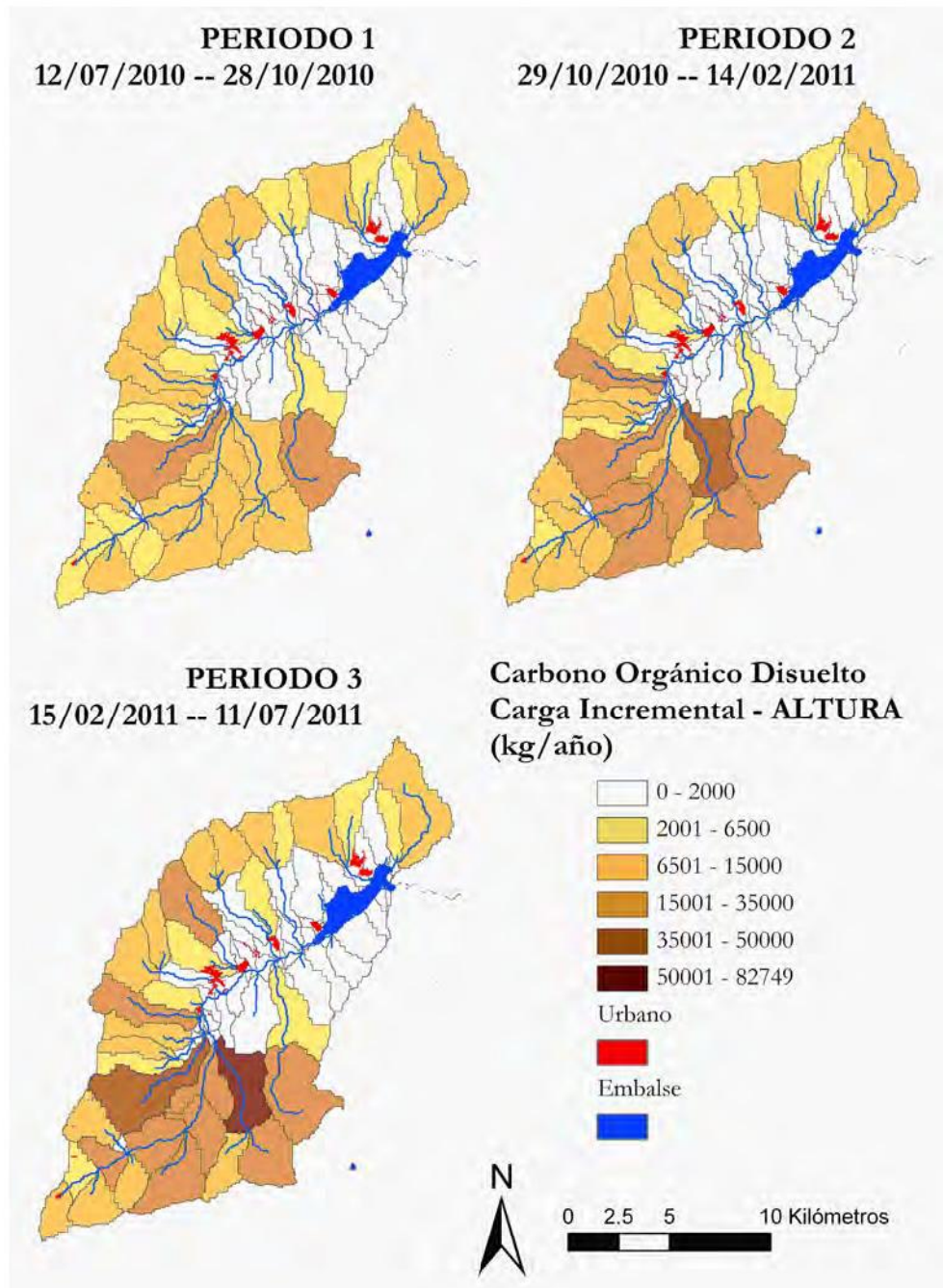


FIGURA 151. CARGA TOTAL DE DOC ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DE SUELO, MODELADA CON SPARROW

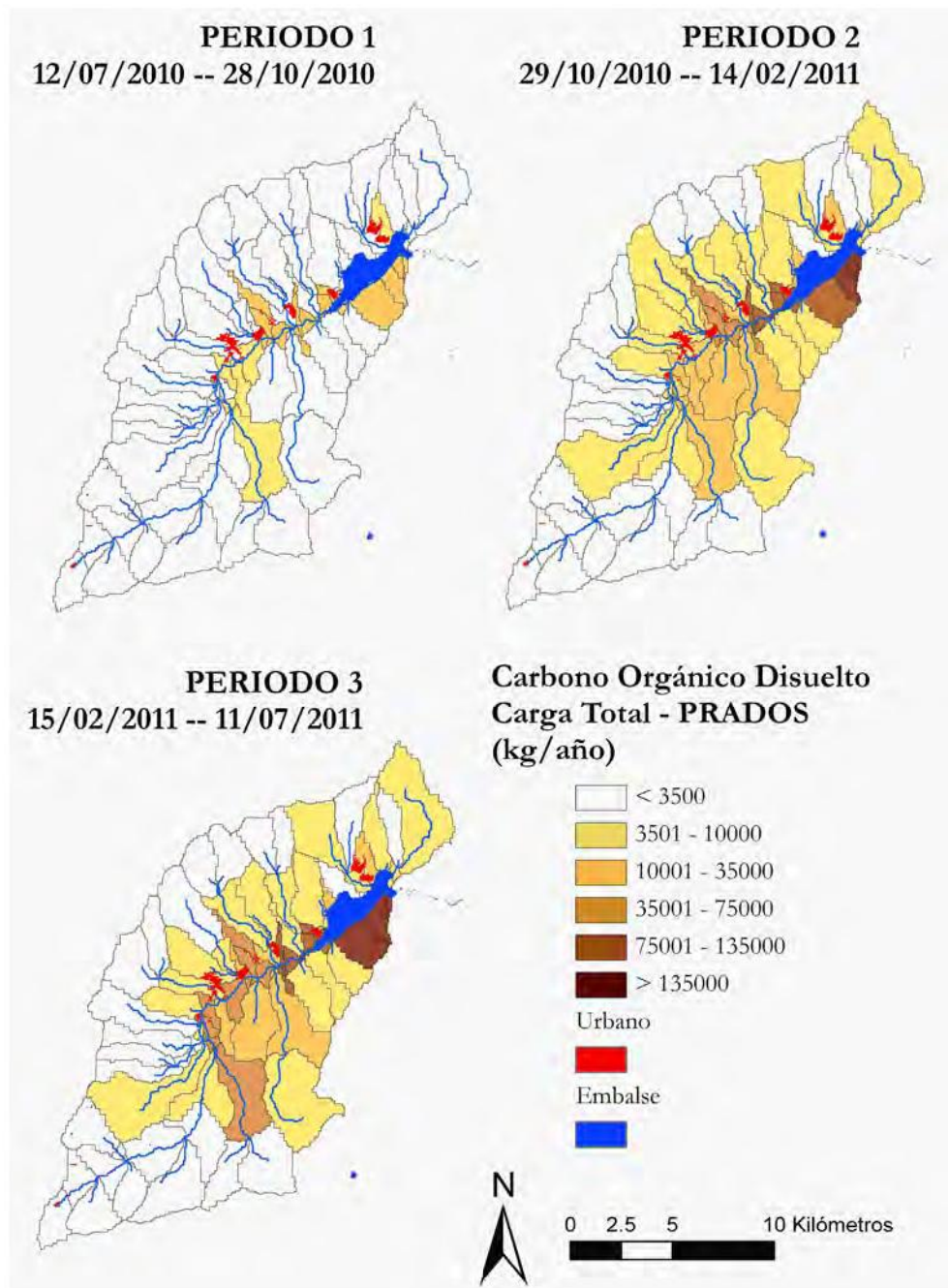


FIGURA 152. CARGA INCREMENTAL DE DOC ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DE SUELO, MODELADA CON SPARROW

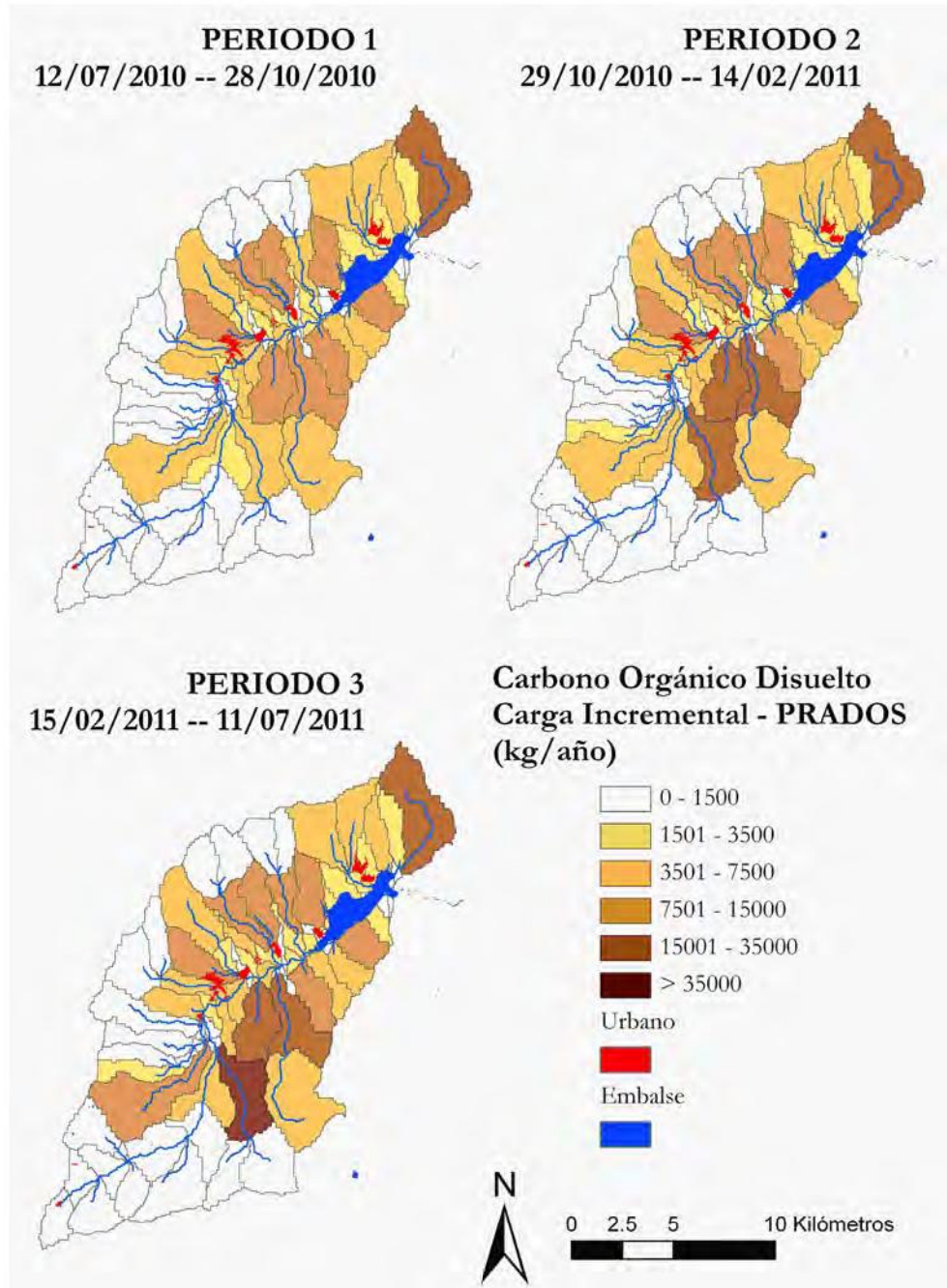


FIGURA 153. CARGA TOTAL DE DOC ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USOS DE SUELO, MODELADA CON SPARROW

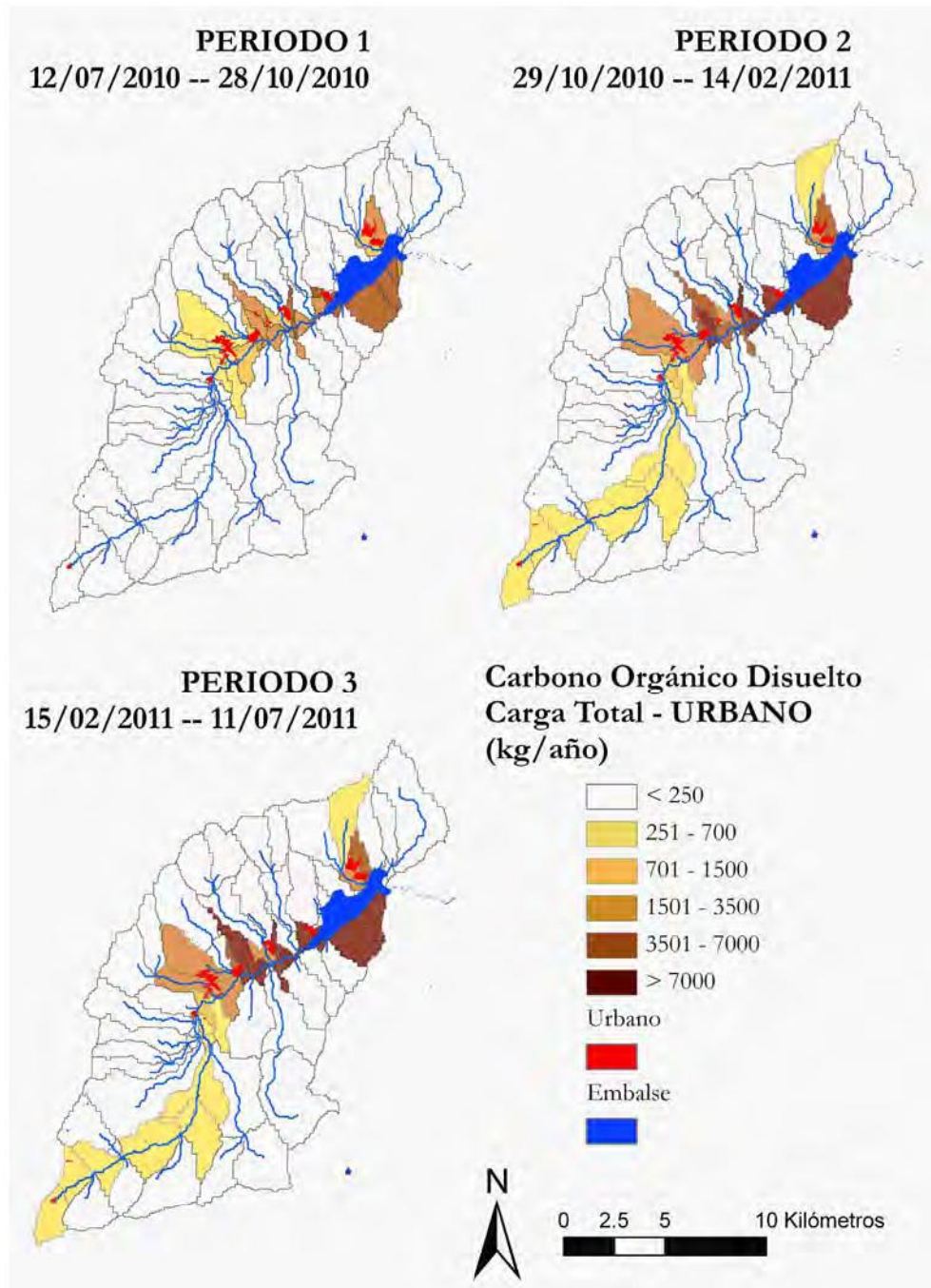
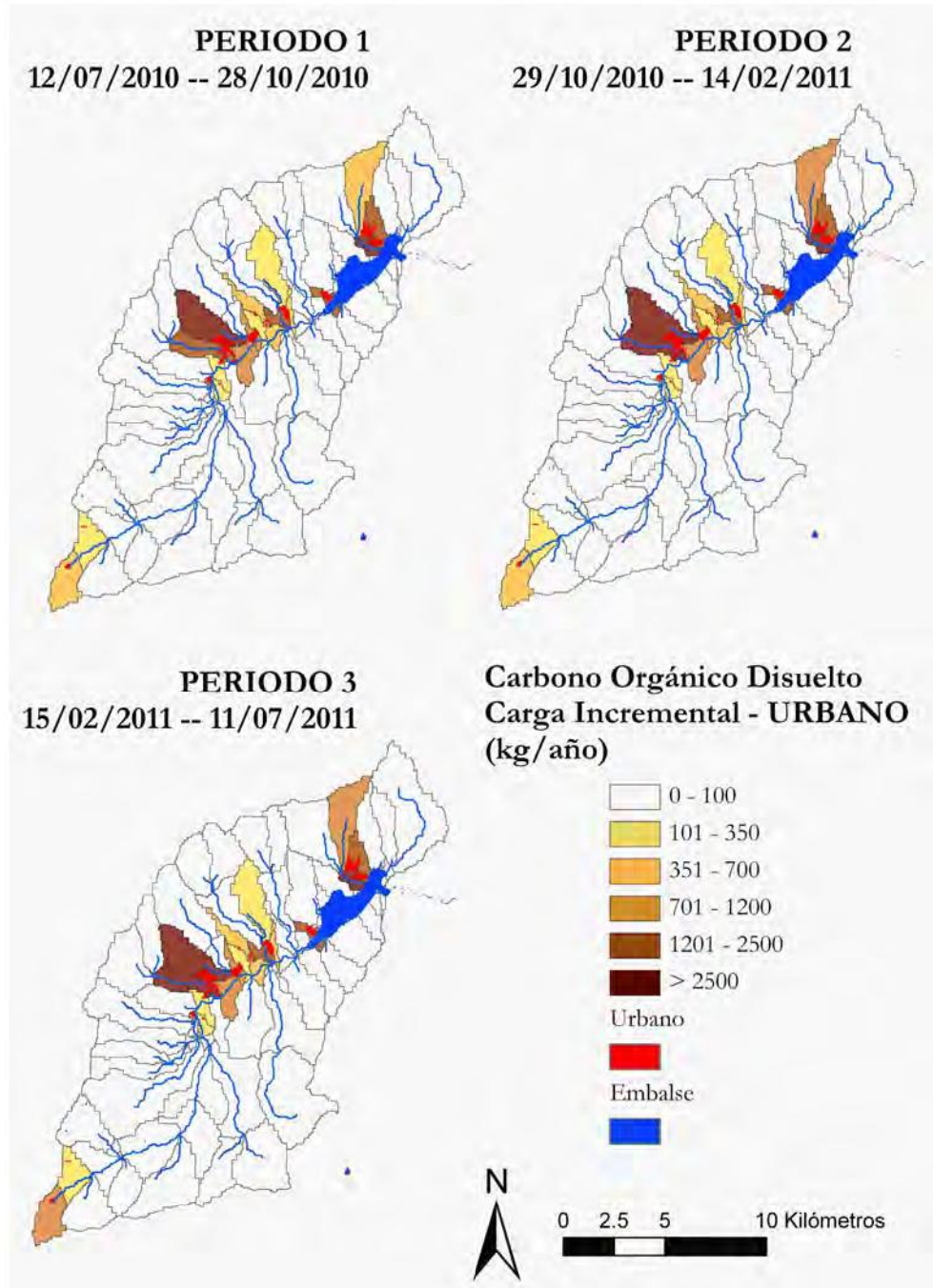


FIGURA 154. CARGA INCREMENTAL DE DOC ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USOS DE SUELO, MODELADA CON SPARROW



4.4.4. Modelo para la demanda química de oxígeno (DQO)

En los resultados del modelado de cargas de DQO con SPARROW aparece muy marcado el aumento temporal a lo largo del cauce principal (Figura 155). En el patrón de incrementos (Figura 156) son las cuencas medias y de cabecera las principales responsables, destacando el río Umbría, y los arroyos del Villar y de Santa Ana.

En la categoría **ALTURA**, las cargas de DQO siguen el aumento temporal en el cauce principal (Figura 157), experimentando los mayores incrementos en el río Umbría, el arroyo Santa Ana y el río Lozoya, aguas arriba de "La Isla" (Figura 158).

Las cargas de DQO en la categoría **PRADOS** repiten el patrón de anteriores compuestos, con un papel importante de las subcuencas de la zona media, donde destacan ligeramente los incrementos en el arroyo del Villar y el arroyo de Santa Ana (Figuras 159 y 160).

Por último, en el uso del suelo **URBANO**, se repite lo observado en las cargas de los anteriores compuestos, con la influencia de Valdesquí, en el cauce principal, en los períodos 2 y 3 (Figura 161); y con las subcuencas en torno a los núcleos de Lozoya, Rascafría y Los Grifos, como los principales incrementos en la carga de DQO (Figura 162).

FIGURA 155. CARGA TOTAL DE DQO ASOCIADA MODELADA CON SPARROW

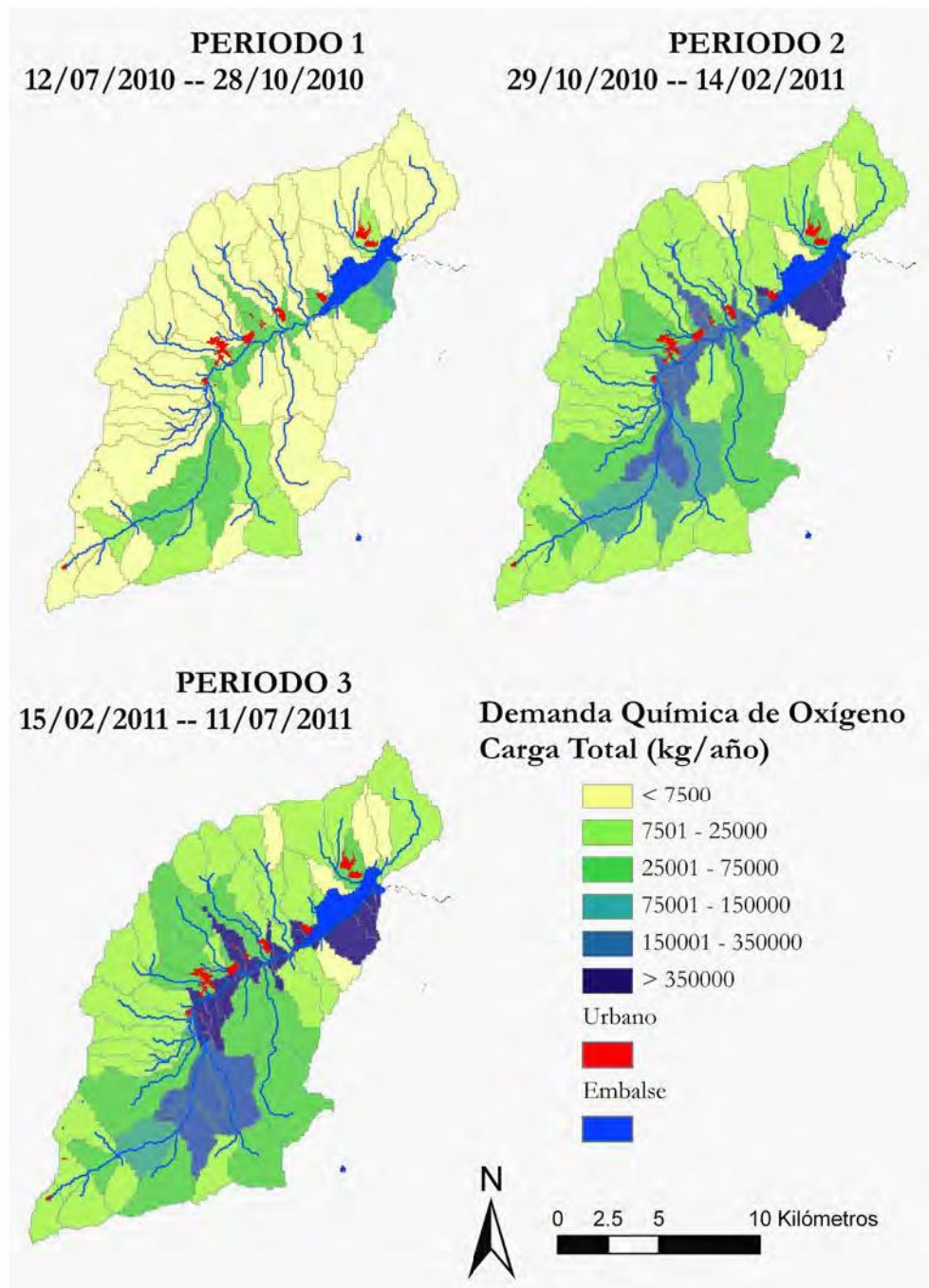


FIGURA 156. CARGA INCREMENTAL DE DQO ASOCIADA MODELADA CON SPARROW

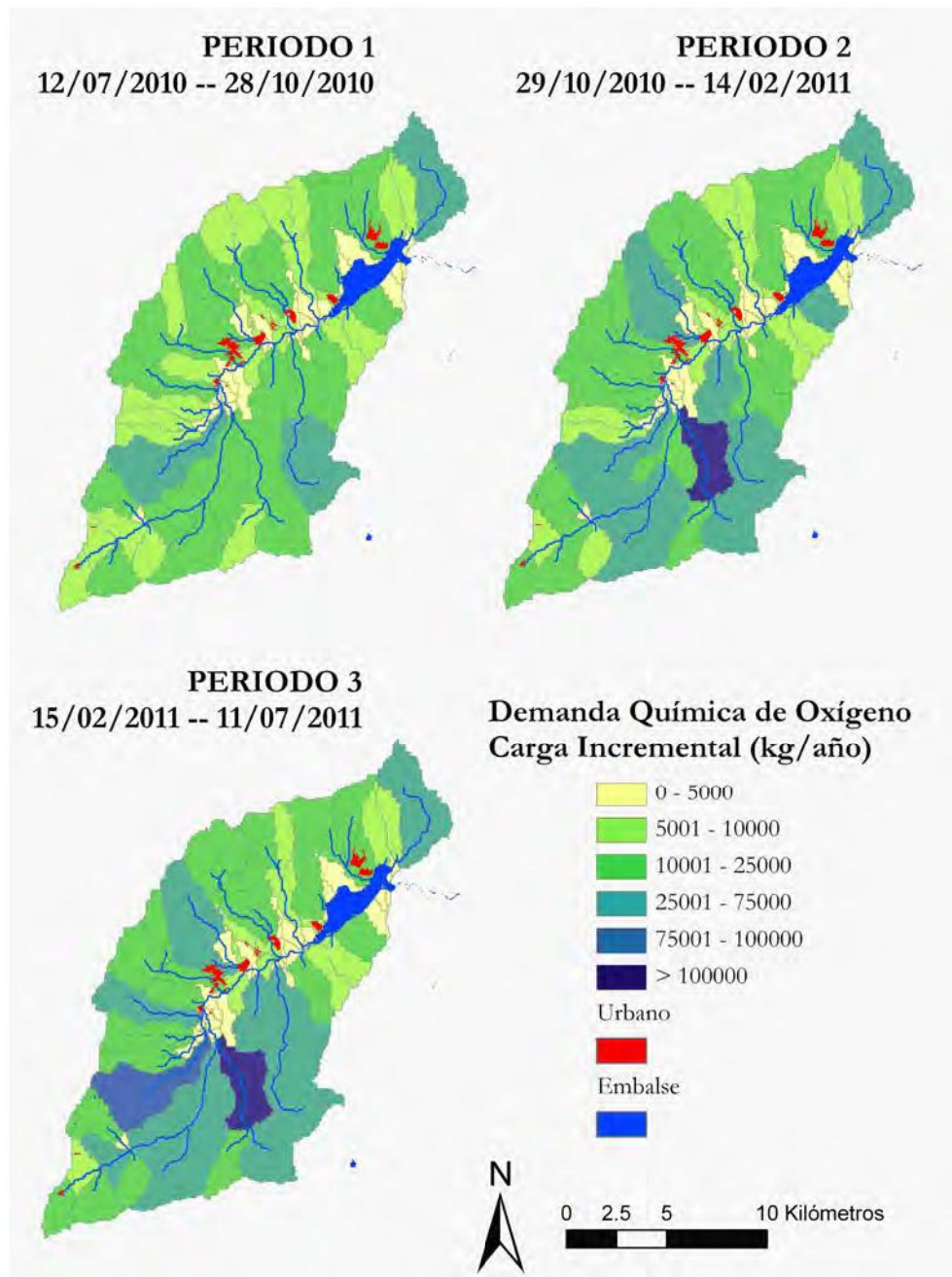


FIGURA 157. CARGA TOTAL DE DQO ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

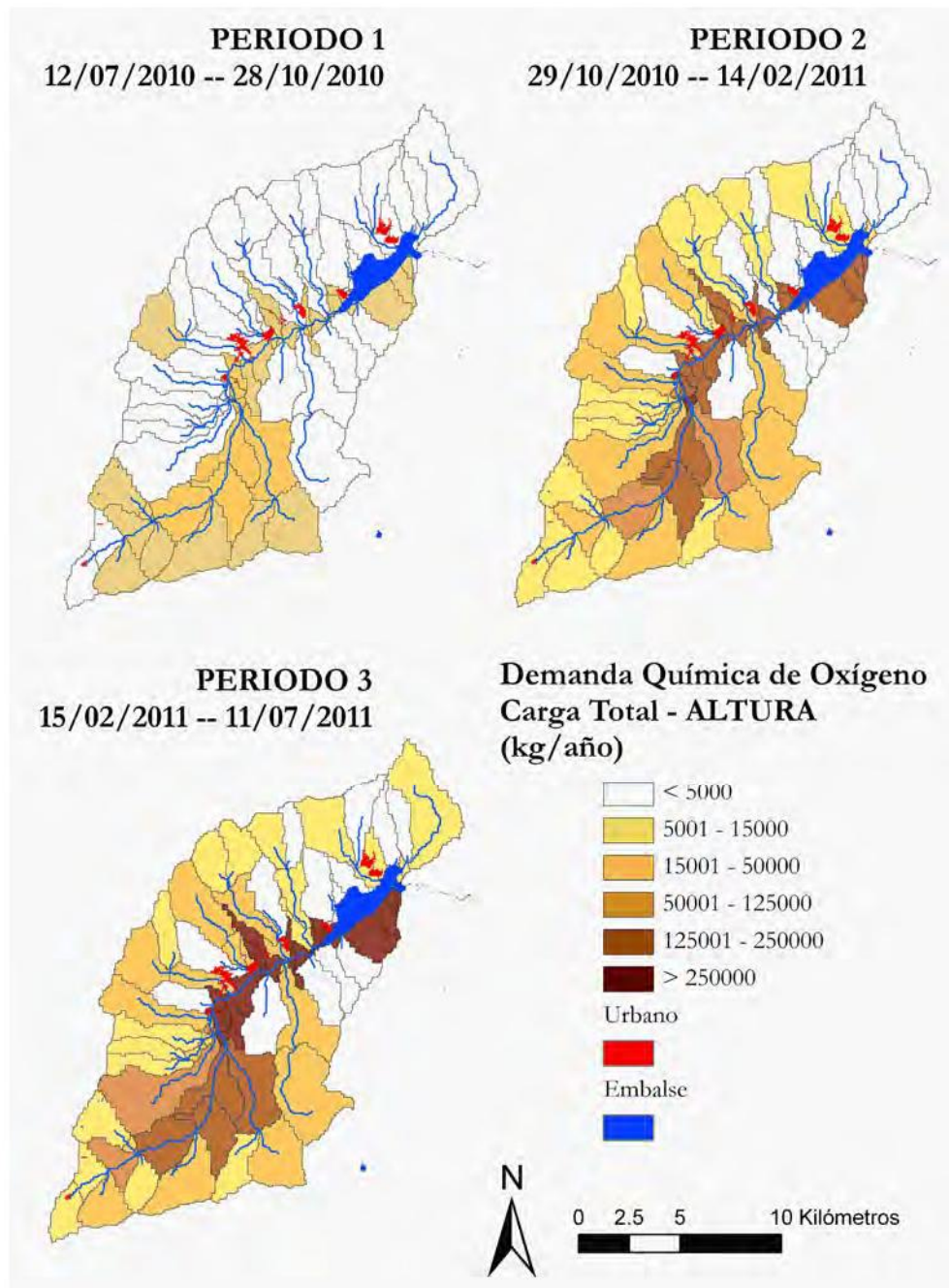


FIGURA 158. CARGA INCREMENTAL DE DQO ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

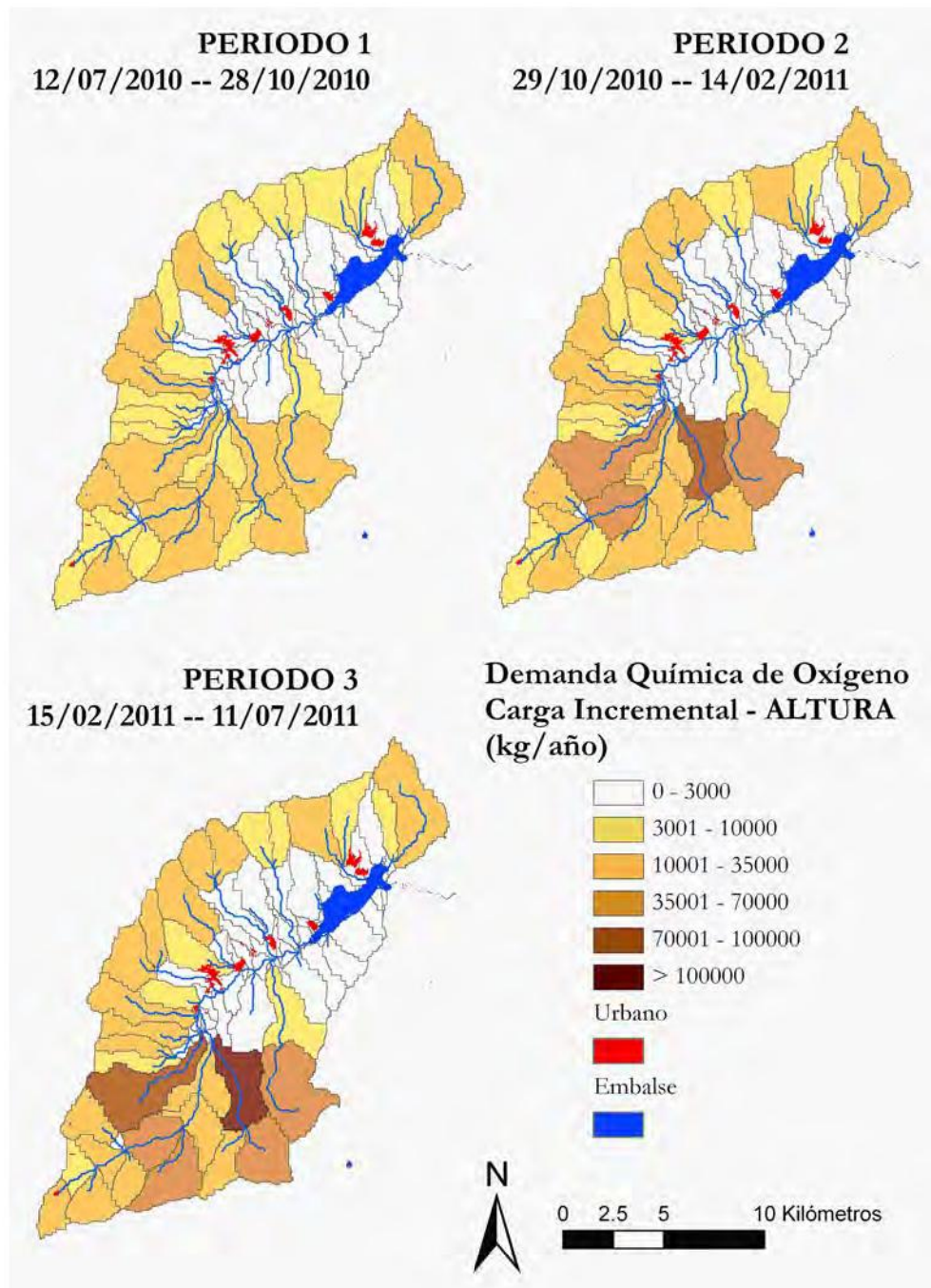


FIGURA 159. CARGA TOTAL DE DQO ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

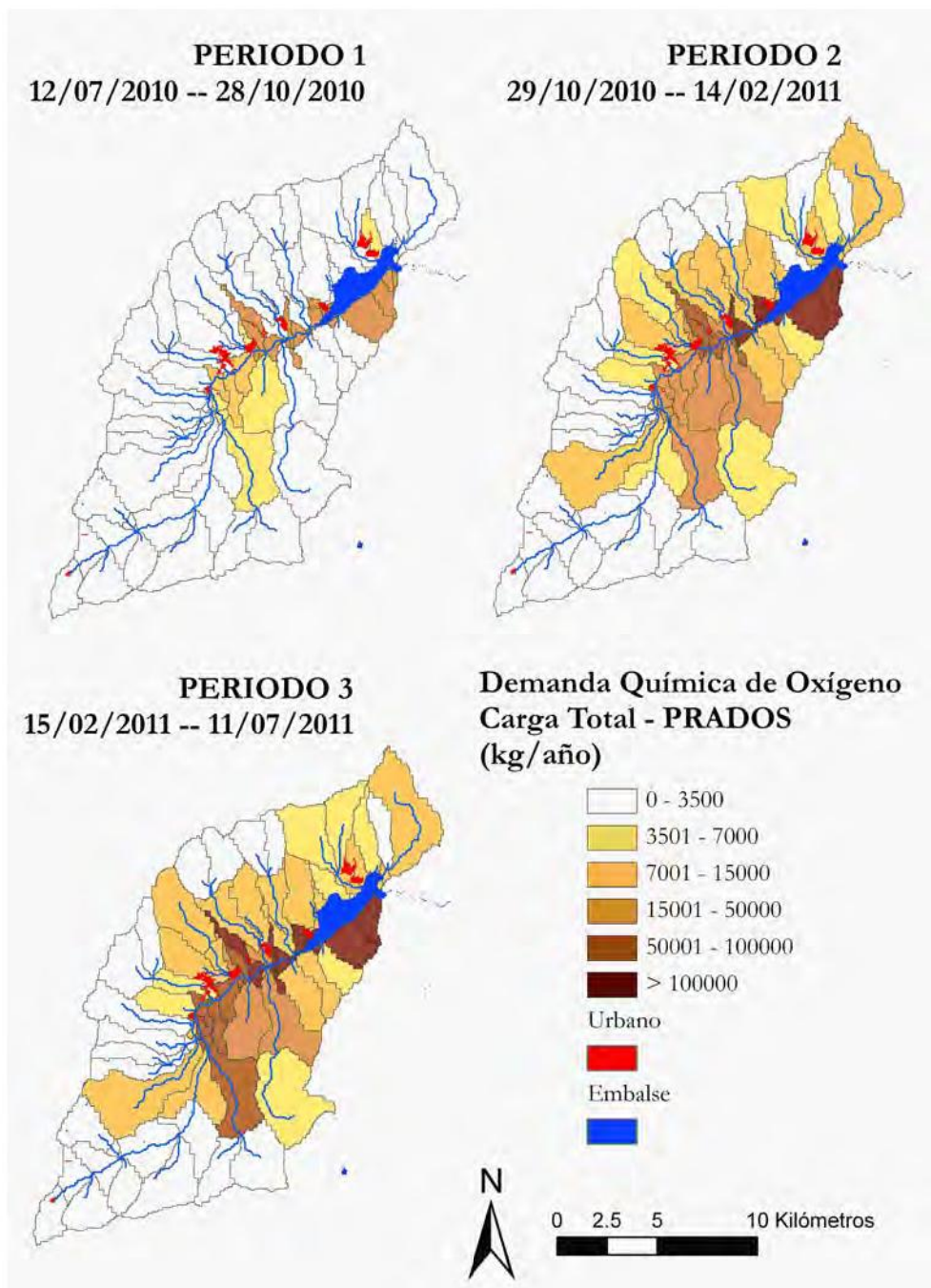


FIGURA 160. CARGA INCREMENTAL DE DQO ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

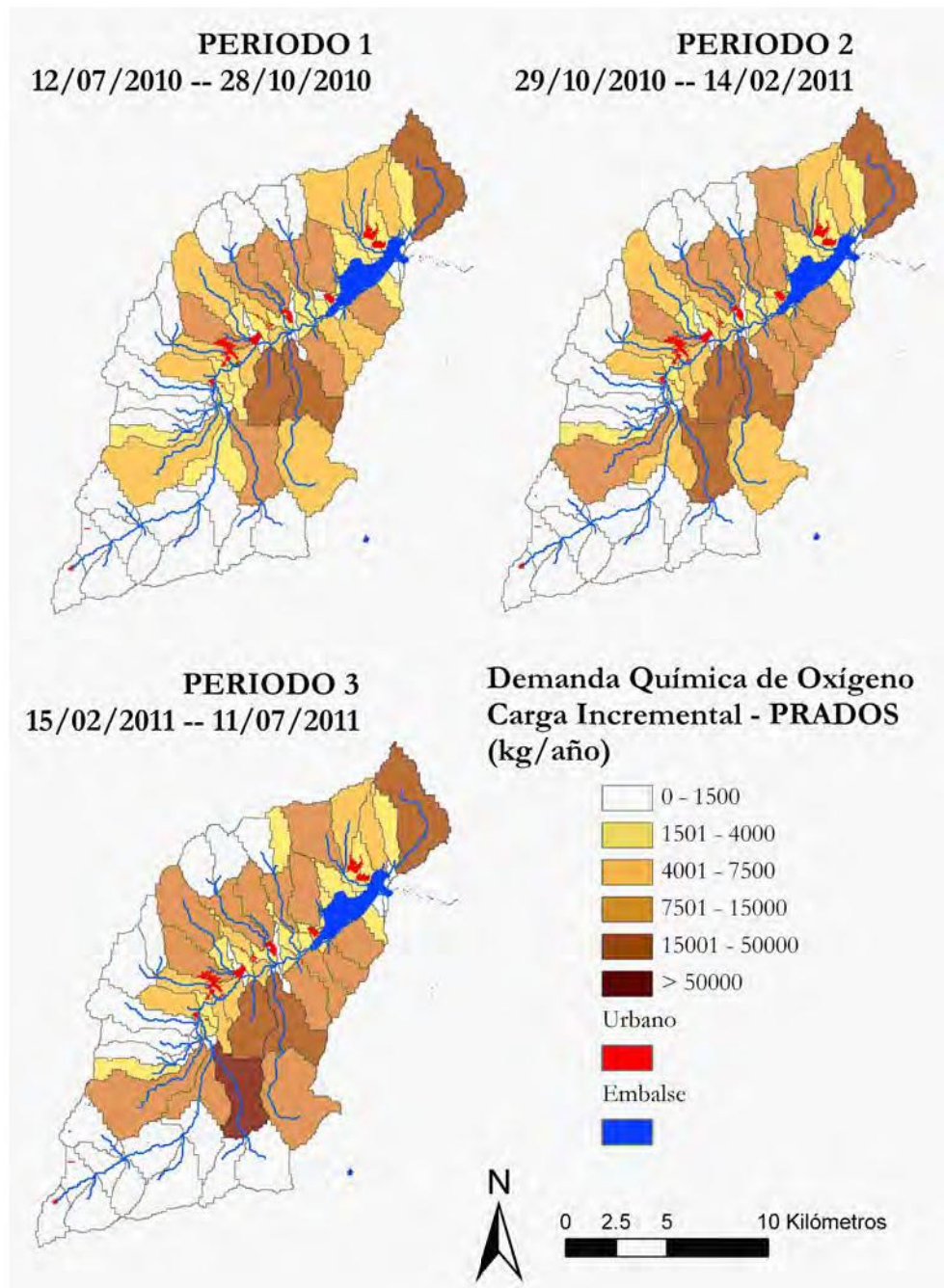


FIGURA 161. CARGA TOTAL DE DQO ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

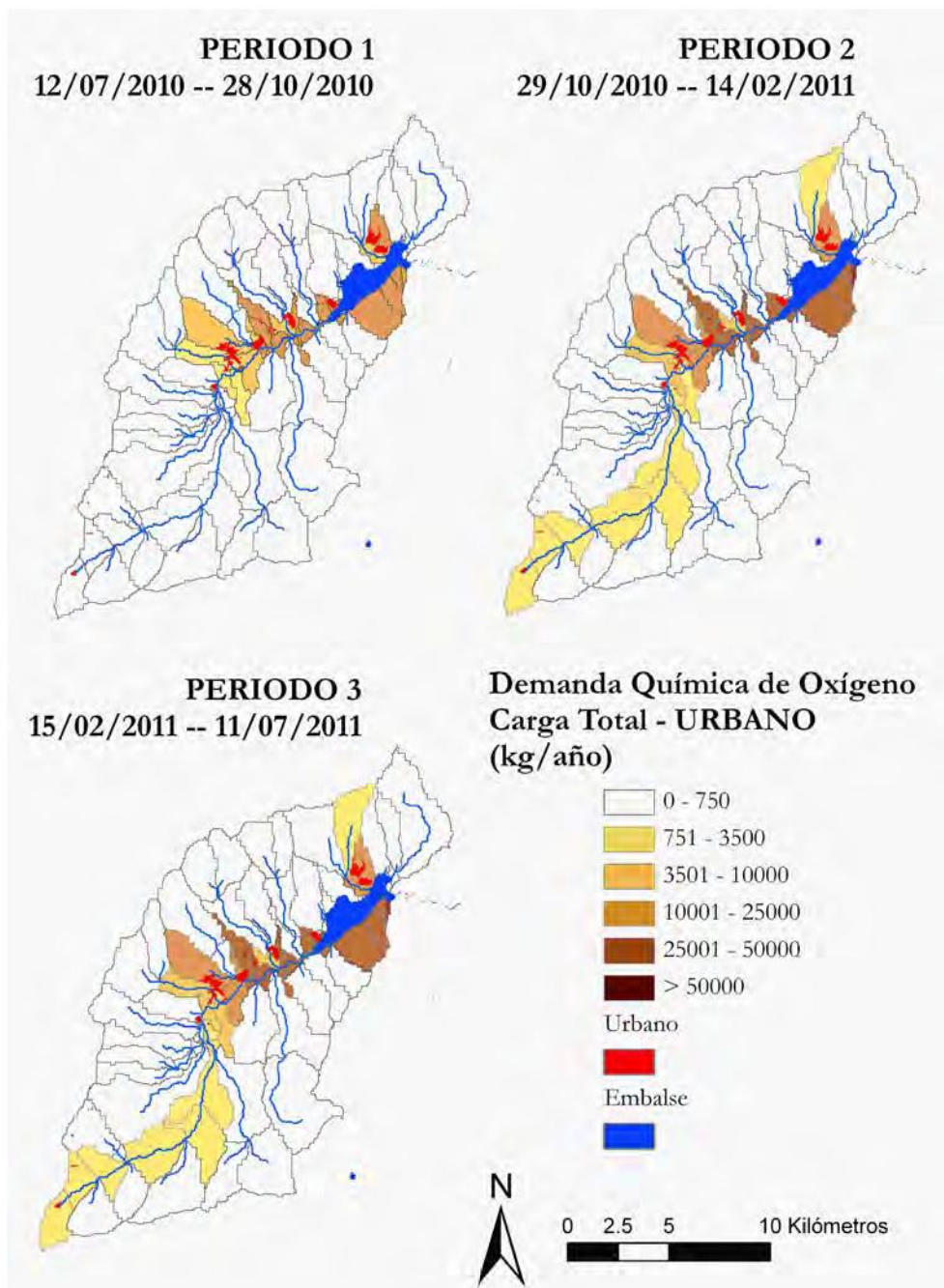
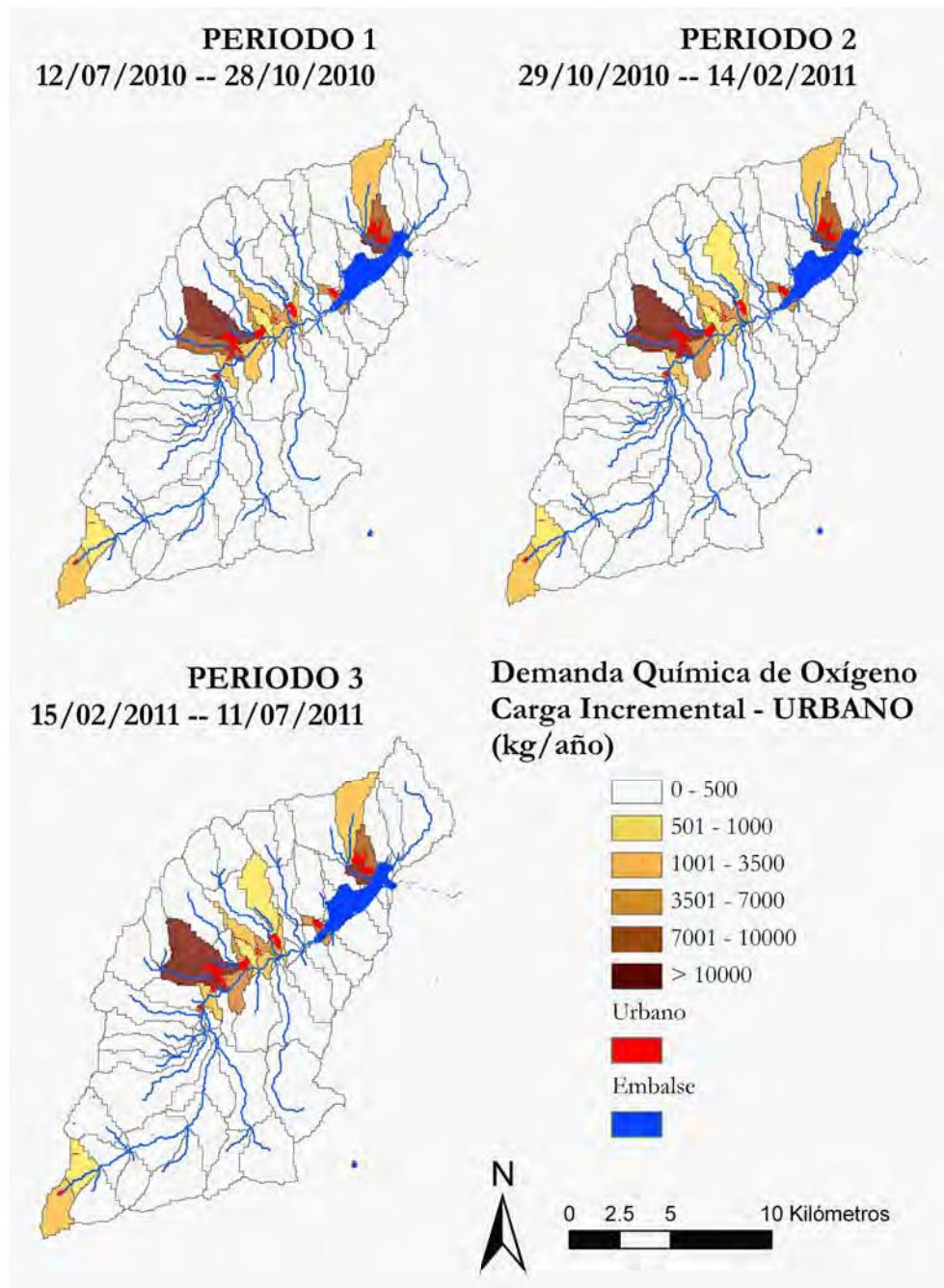


FIGURA 162. CARGA INCREMENTAL DE DQO ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW



4.4.5. Modelo para el hierro disuelto

Respecto a las cargas de hierro, la concentración en el cauce principal es muy clara, especialmente en el período 1 (Figura 163), si bien los incrementos están bastante repartidos en las zonas medias de la cuenca de Pinilla, destacando especialmente la subcuenca que engloba a la EDAR, seguida por el arroyo del Villar, el de Santa Ana y el río Umbría (Figura 164).

En cuanto a las cargas asociadas al uso del suelo **ALTURA**, los principales incrementos se concentran en torno al río Umbría y el arroyo de Santa Ana (Figuras 165 y 166).

Respecto a las cargas de hierro asociadas a la categoría **PRADOS**, repiten tanto el patrón de incremento temporal de cargas totales (Figura 167), como los principales incrementos situados en los arroyos del Villar y de Santa Ana (Figuras 168).

Por último, en la categoría **URBANO**, los incrementos de cargas de hierro más significativos se producen en la subcuenca del arroyo del Gallinero, asociada a los núcleos de Los Grifos y Rascafría (Figura 170). Mientras, a diferencia de anteriores compuestos, no se aprecian incrementos en la carga de Hierro en la subcuenca de Valdesquí (Figura 169).

FIGURA 163. CARGA TOTAL DE HIERRO MODELADA CON SPARROW

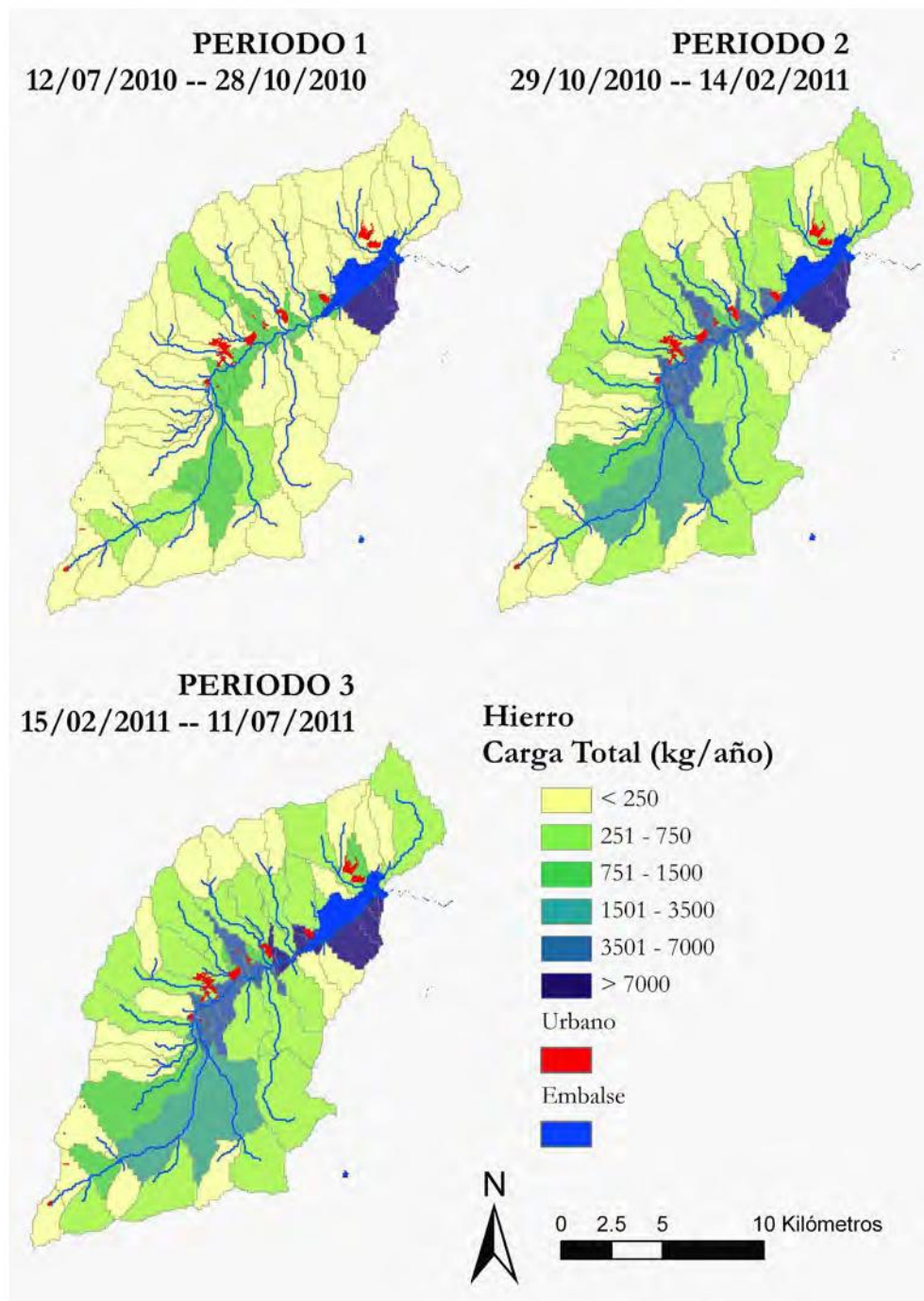


FIGURA 164. CARGA INCREMENTAL DE HIERRO MODELADA CON SPARROW

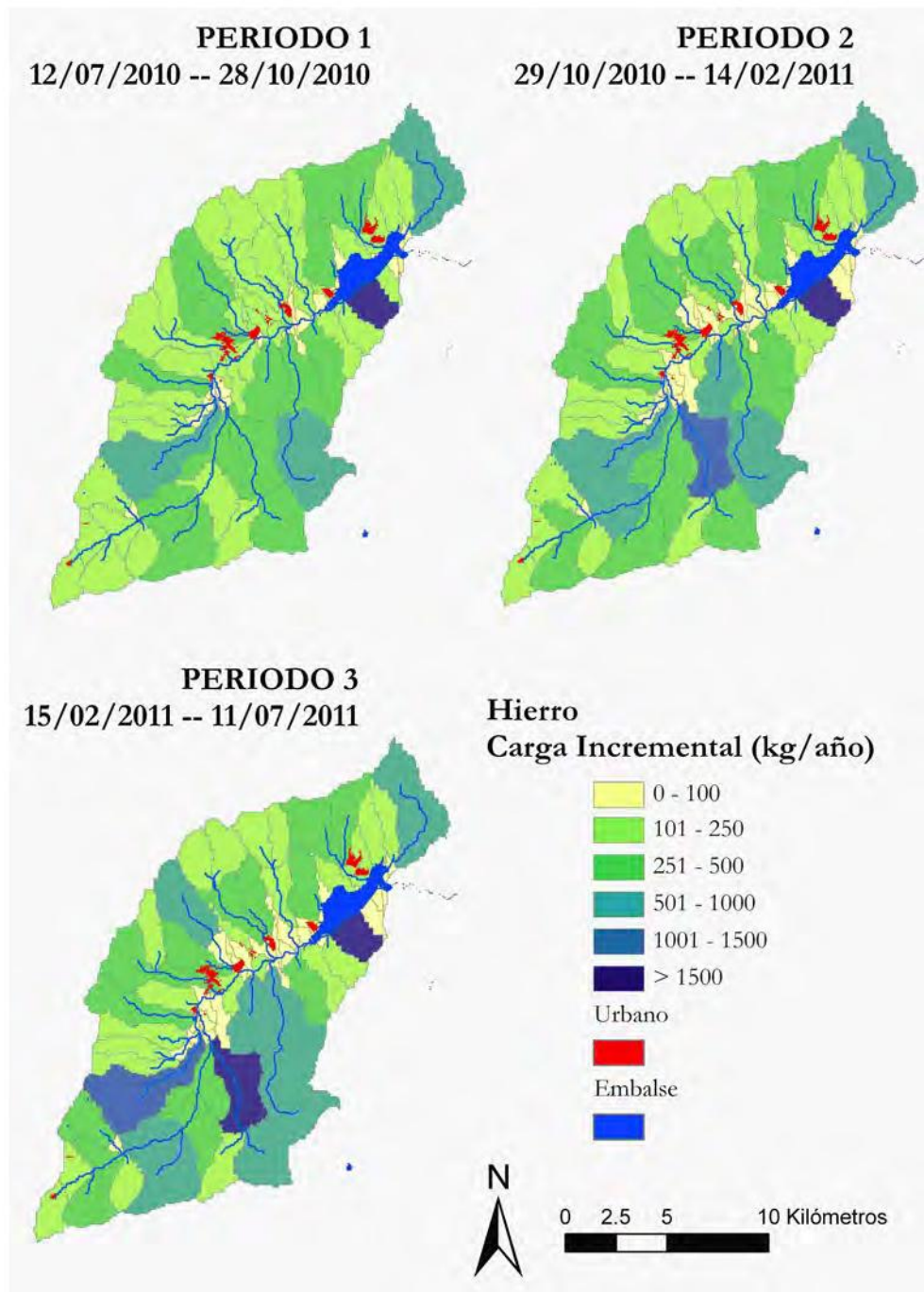


FIGURA 165. CARGA TOTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

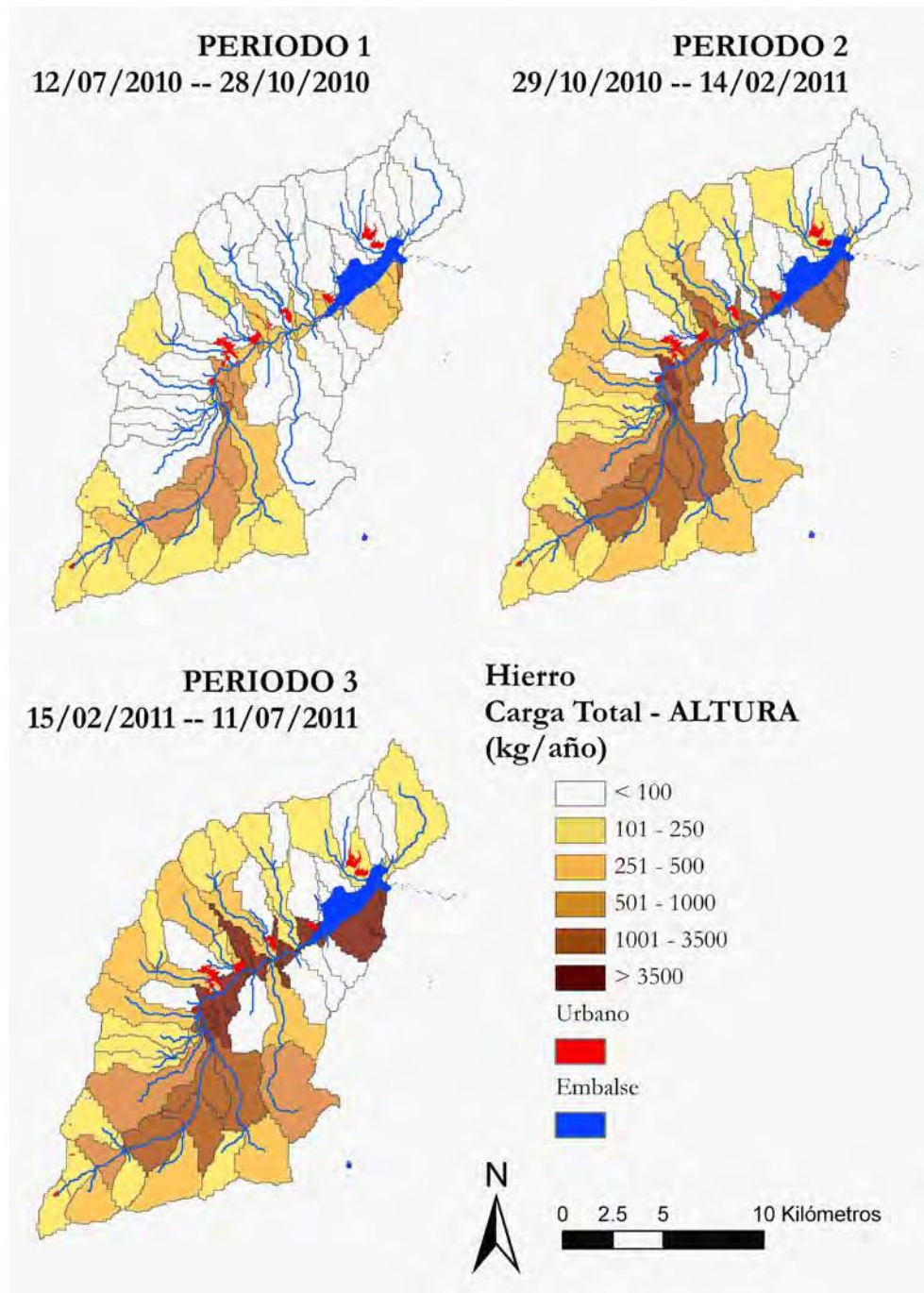


FIGURA 166. CARGA INCREMENTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

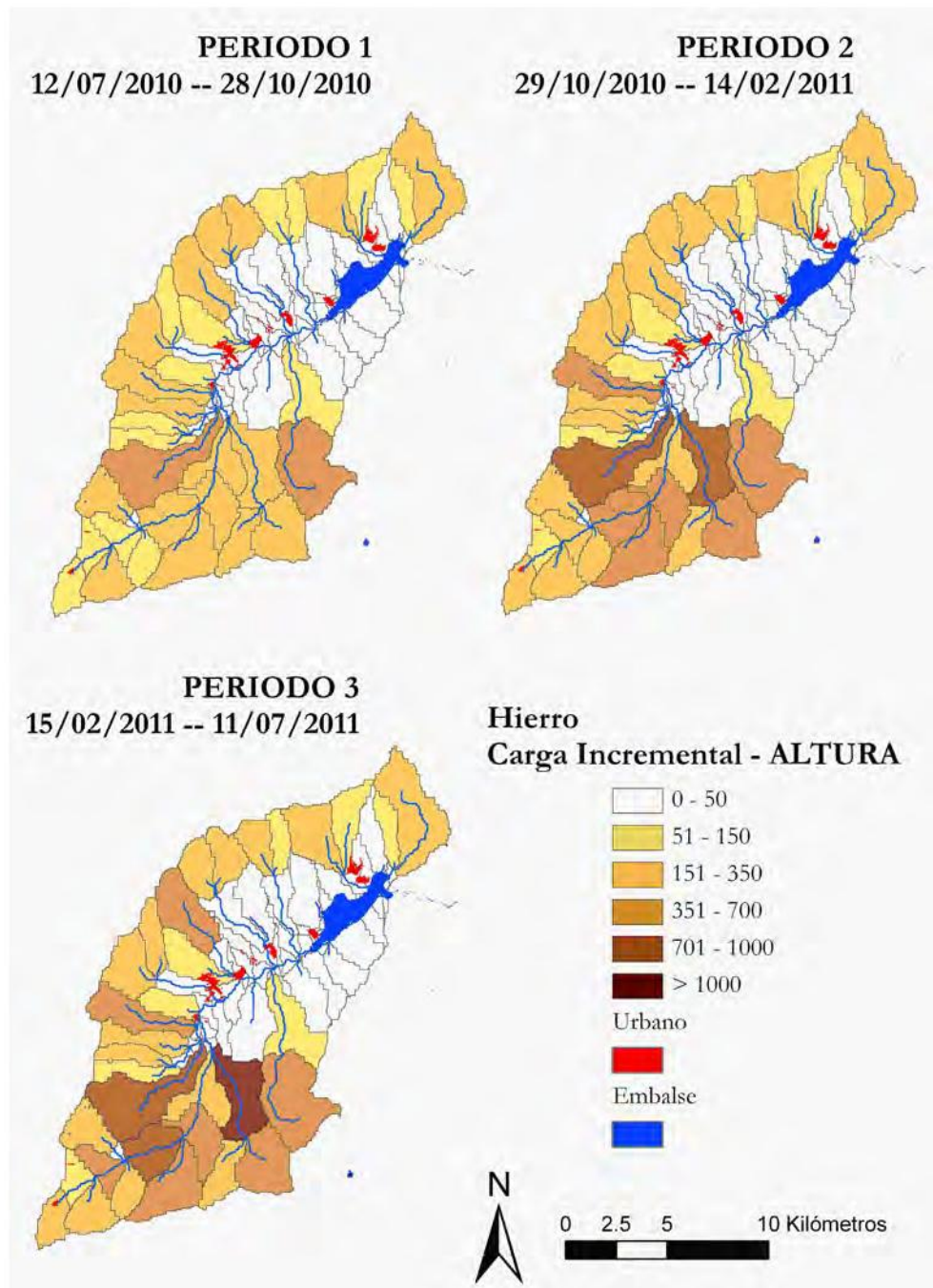


FIGURA 167. CARGA TOTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

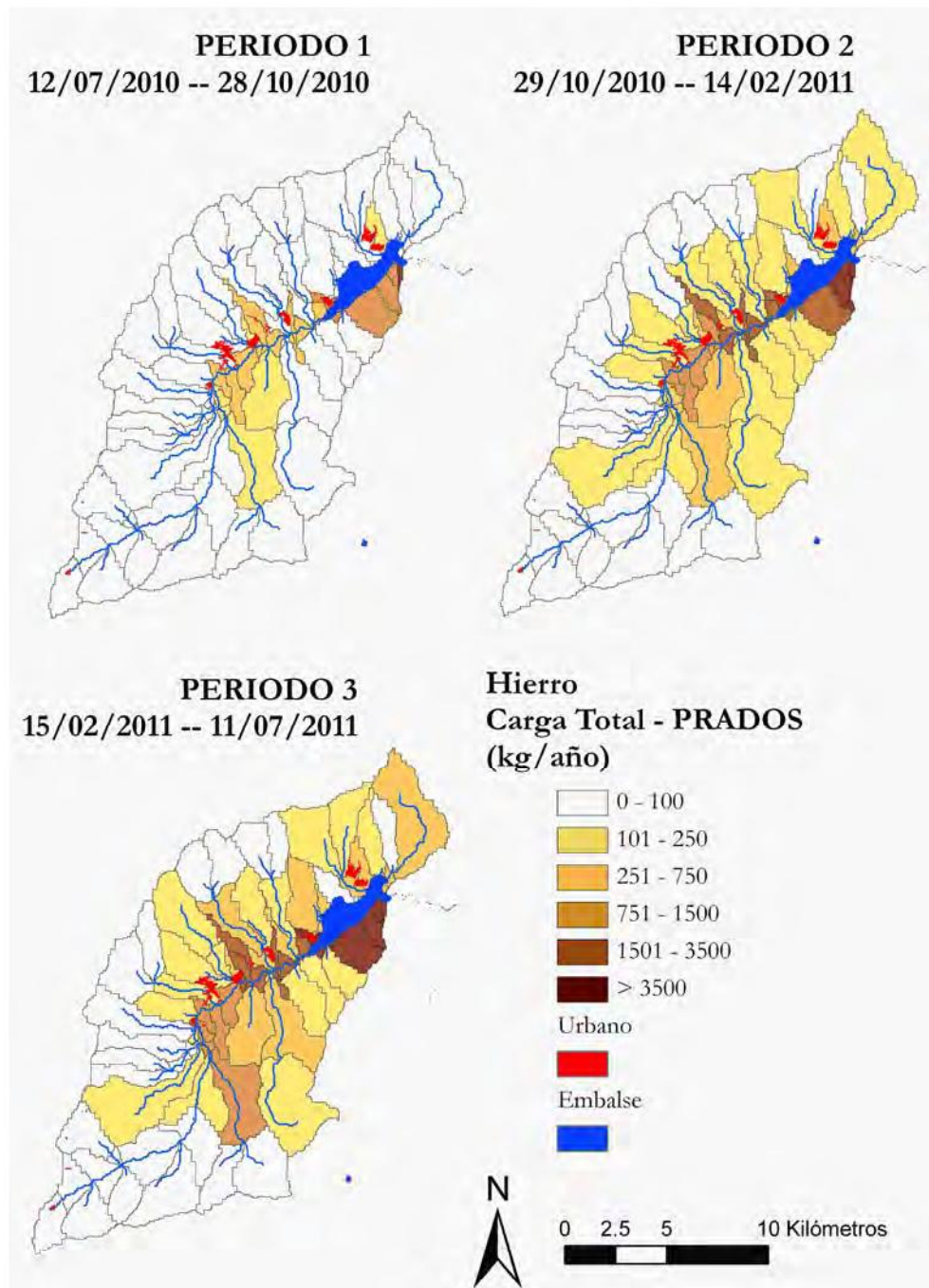


FIGURA 168. CARGA INCREMENTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

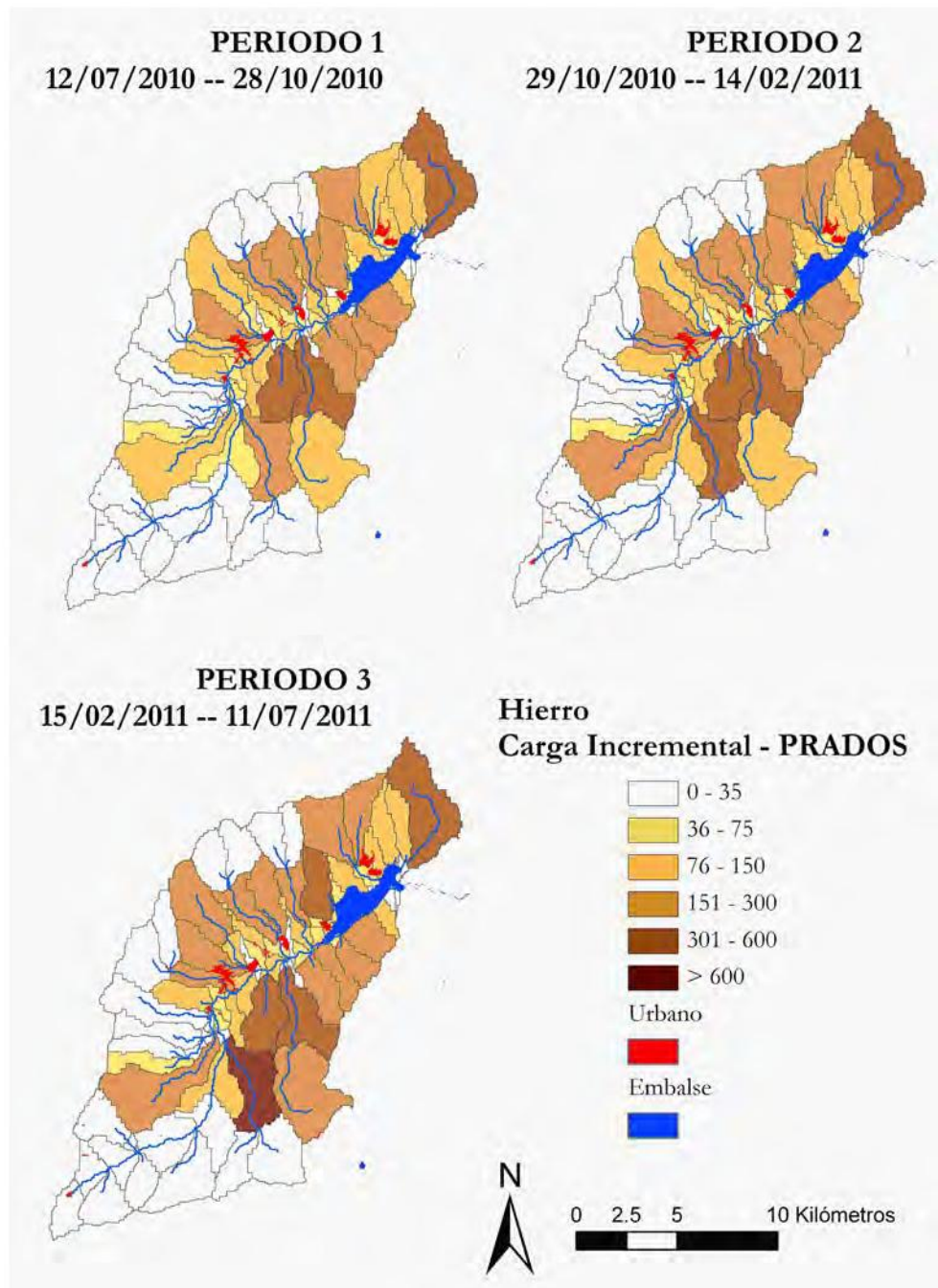


FIGURA 169. CARGA TOTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA *URBANO* DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

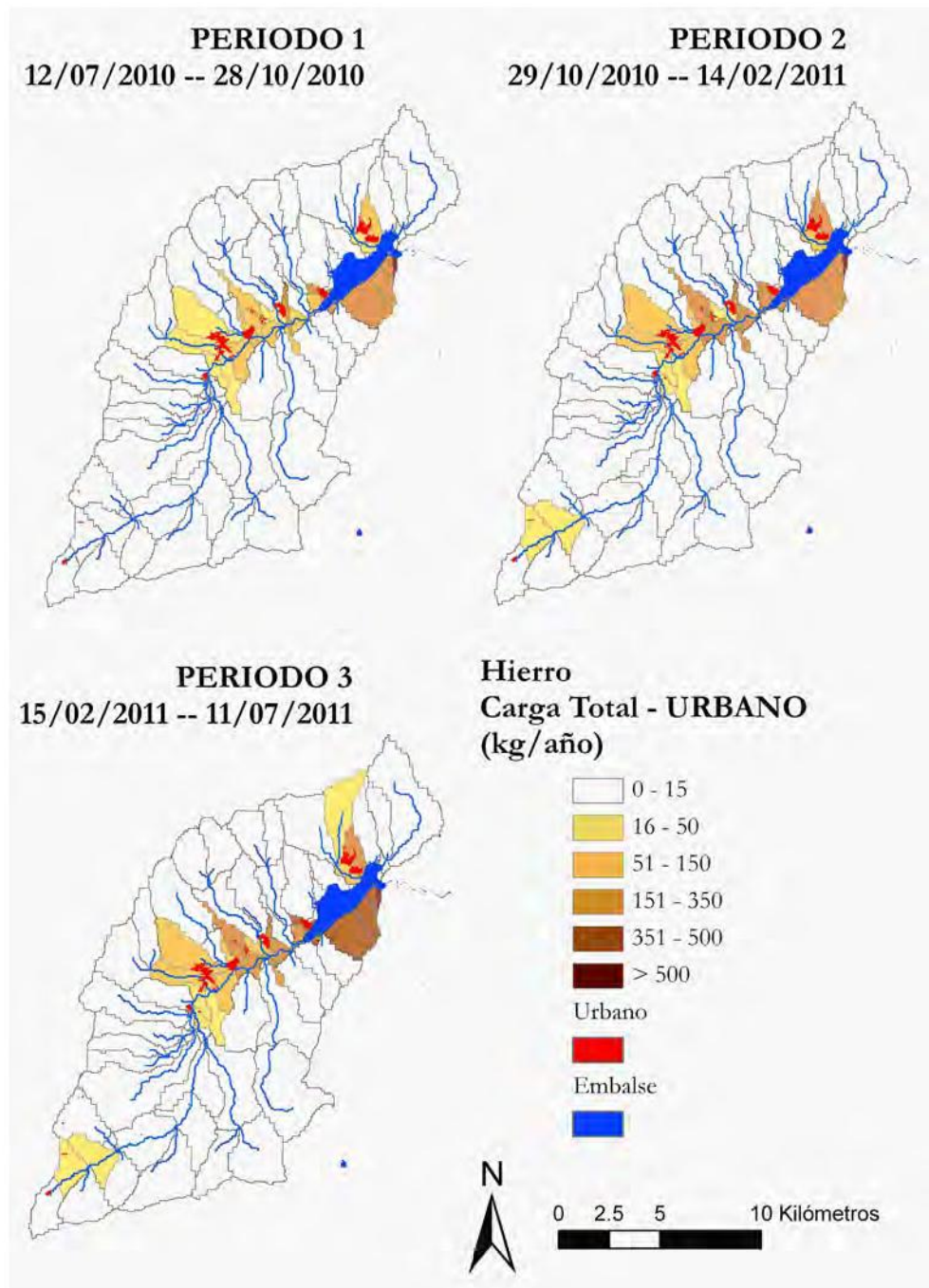
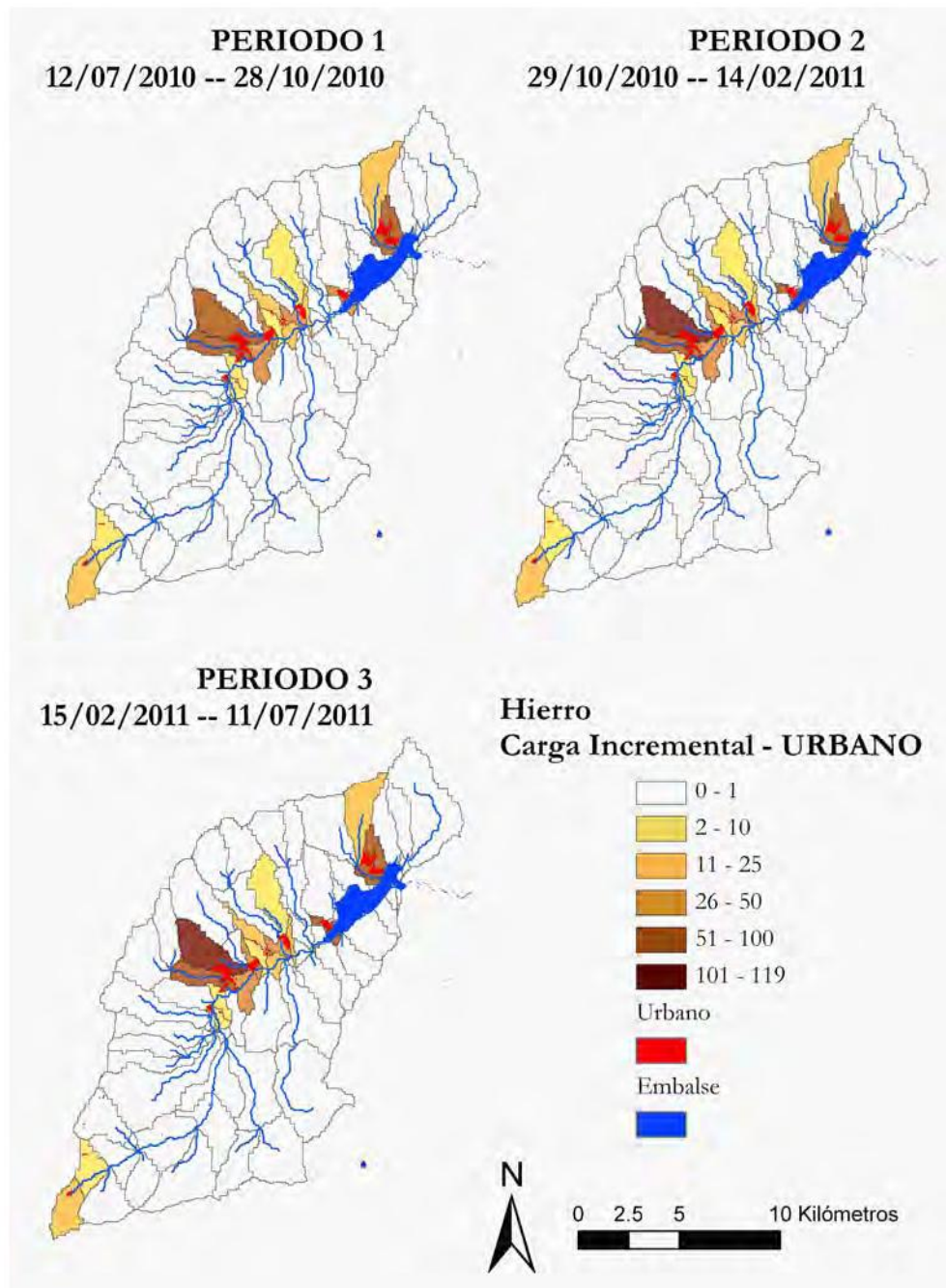


FIGURA 170. CARGA INCREMENTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW



4.4.6. Modelo para el manganeso

Respecto a las cargas de manganeso, el aumento temporal en el cauce principal se extiende a la subcuenca del arroyo de Santa Ana (Figura 171), siendo muy elevada desde subcuencas próximas a cabecera, como es la del área de “La Isla”. El patrón de incrementos (Figura 172) muestra que buena parte de los aportes de manganeso se producen en la zona de cabecera del río Lozoya, destacando el río Umbría, la cabecera del arroyo de Santa Ana y las subcuencas adyacentes al área de “La Isla”.

La categoría de usos del suelo **ALTURA**, ofrece unos resultados en consonancia con los anteriormente vistos. Así, las cargas totales se concentran en la zona de cabecera (Figura 173), teniendo una influencia bastante baja aguas abajo, que incluso llega a ser nula en el período 1. Por su parte, los incrementos de manganeso (Figura 174) se concentran en las áreas citadas en el apartado previo (río Umbría, arroyo de Santa Ana y subcuencas adyacentes a “La Isla”).

La categoría **PRADOS**, por su parte, adquieren una baja importancia en el modelado de cargas de manganeso, con una presencia sólo destacable en la EDAR y las subcuencas de menor tamaño adyacentes a los núcleos urbanos (Figura 175). Los incrementos, de una magnitud muy baja (Figura 176), son apreciables en las subcuencas de la zona media que rodean a los núcleos urbanos, los arroyos del Villar y de Santa Ana, y el río Umbría.

Por último, las cargas de manganeso asociadas a la categoría **URBANO** (Figuras 177 y 178), muestran que su mayor magnitud se asocia a este uso del suelo. Los principales núcleos responsables de los incrementos vuelven a ser Lozoya, Rascafría y Los Grifos.

FIGURA 171. CARGA TOTAL DE MANGANESO MODELADA CON SPARROW

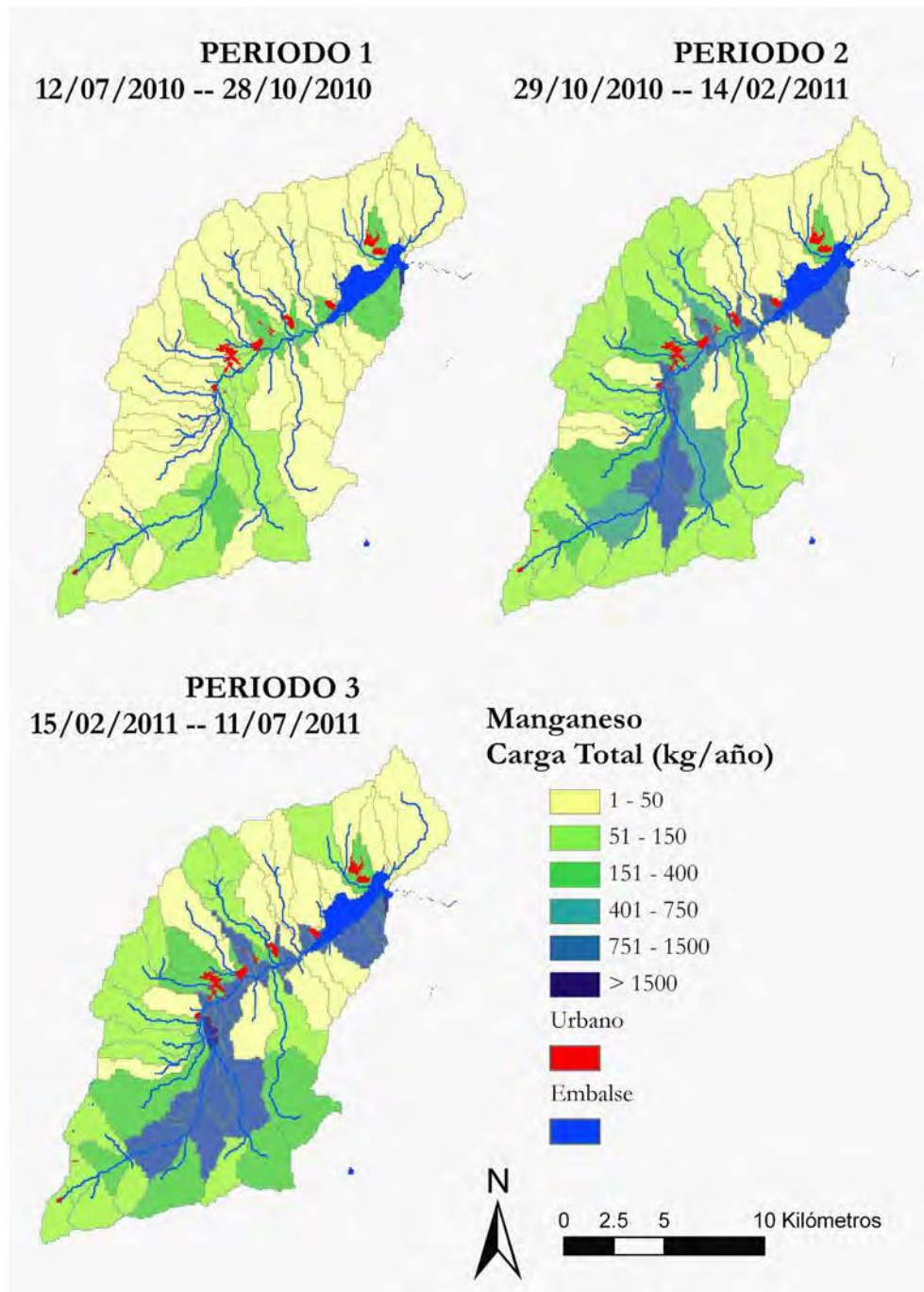


FIGURA 172. CARGA INCREMENTAL DE MANGANESO MODELADA CON SPARROW

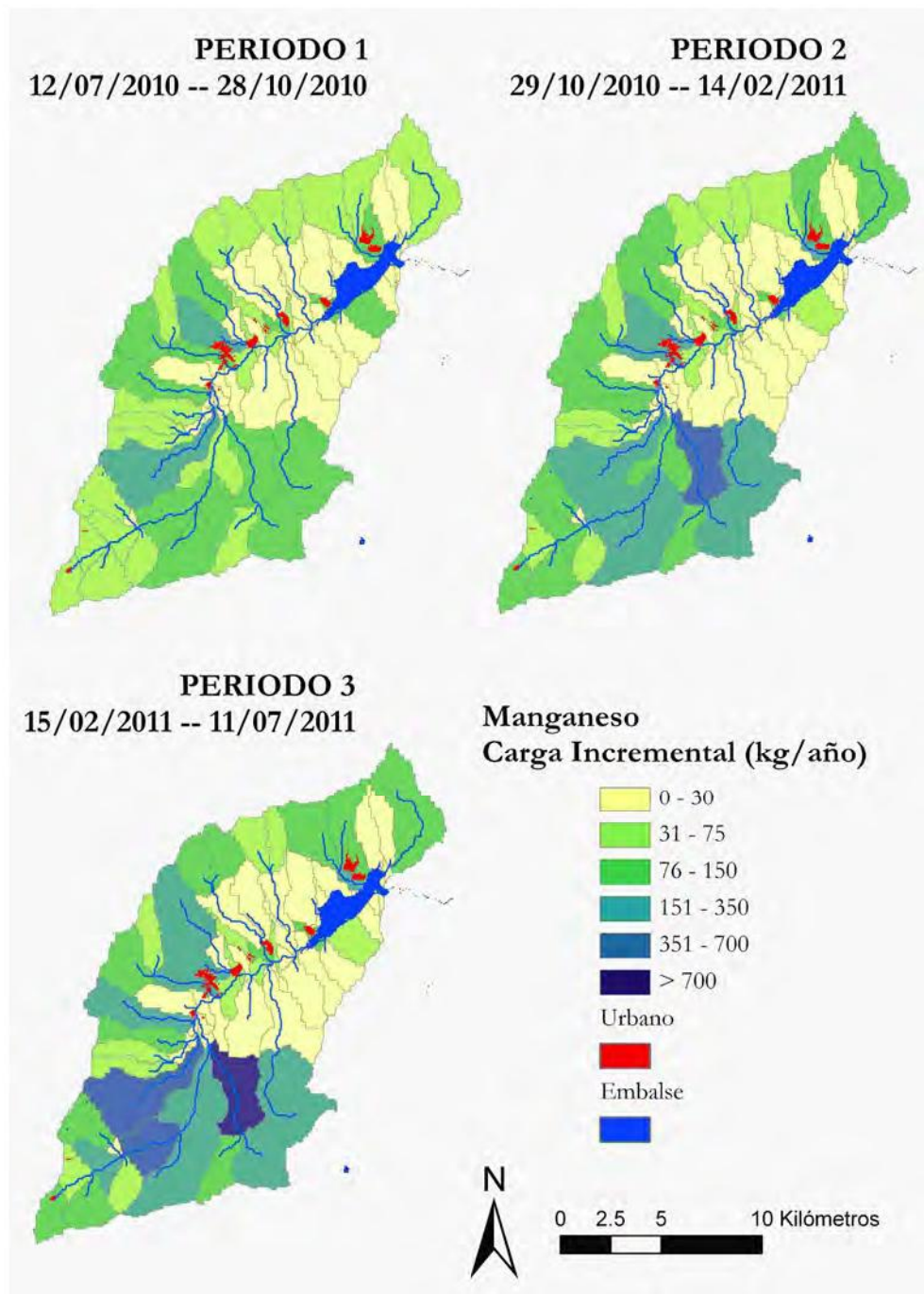


FIGURA 173. CARGA TOTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

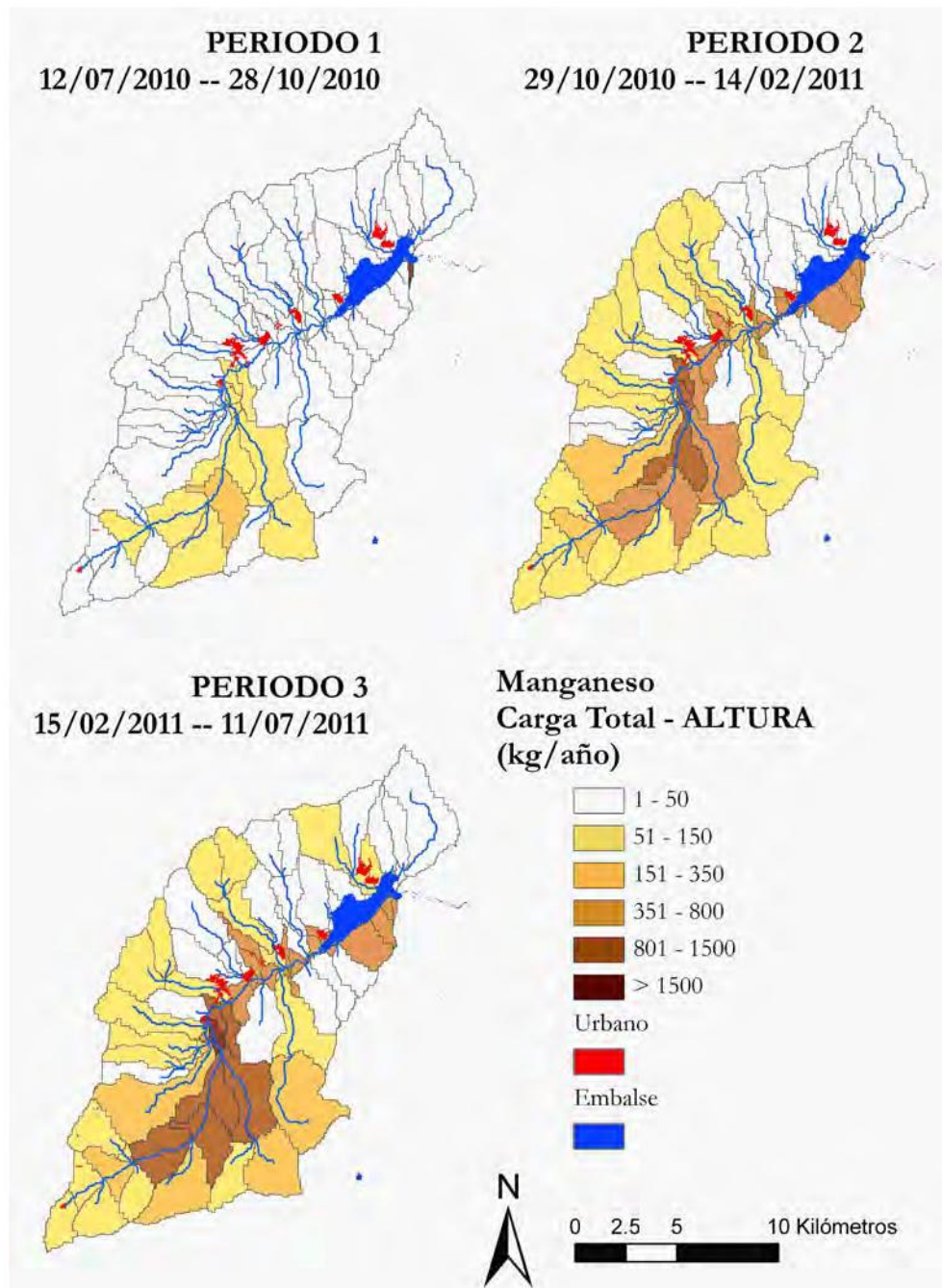


FIGURA 174. CARGA INCREMENTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

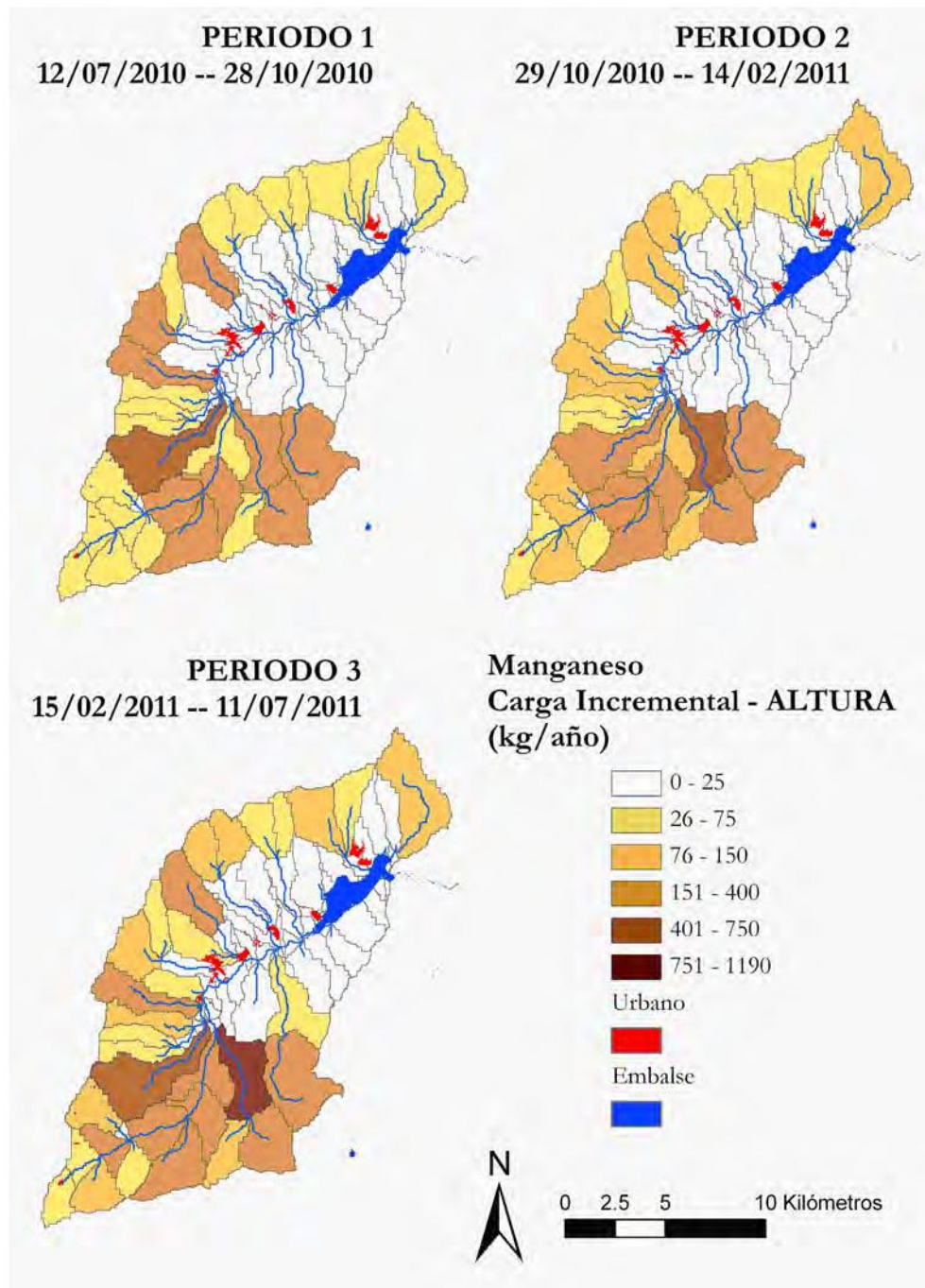


FIGURA 175. CARGA TOTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

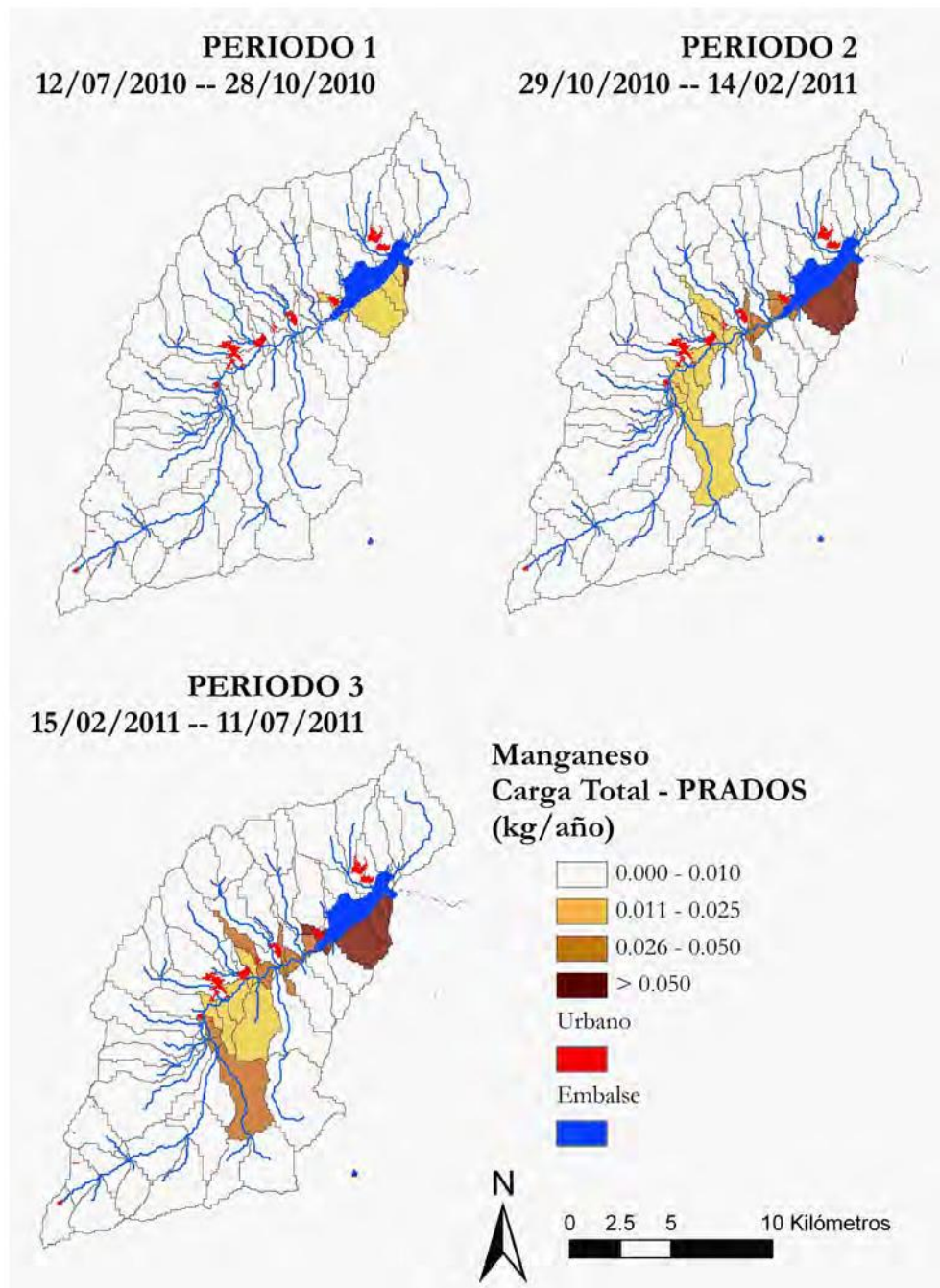


FIGURA 176. CARGA INCREMENTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

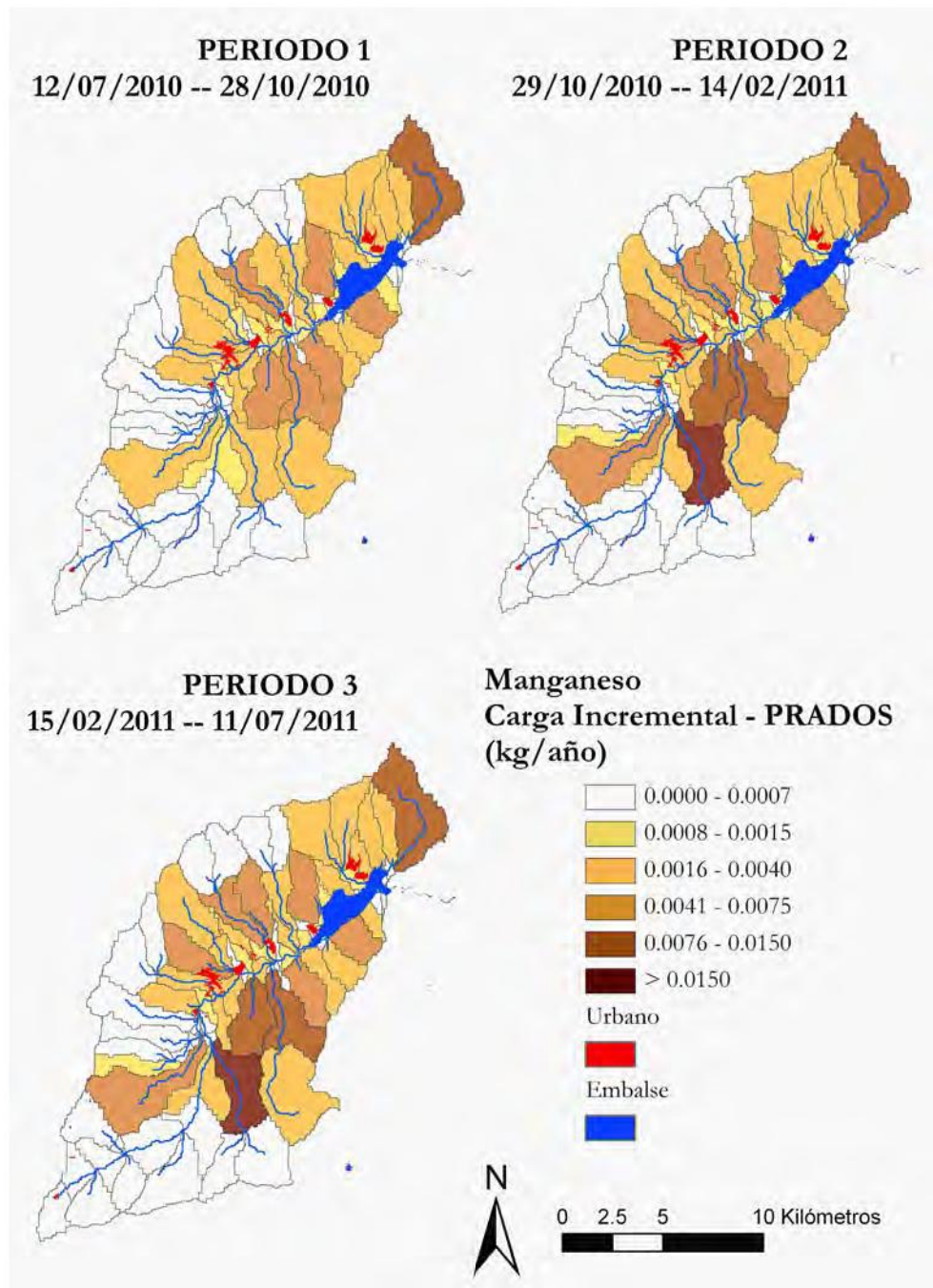


FIGURA 177. CARGA TOTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

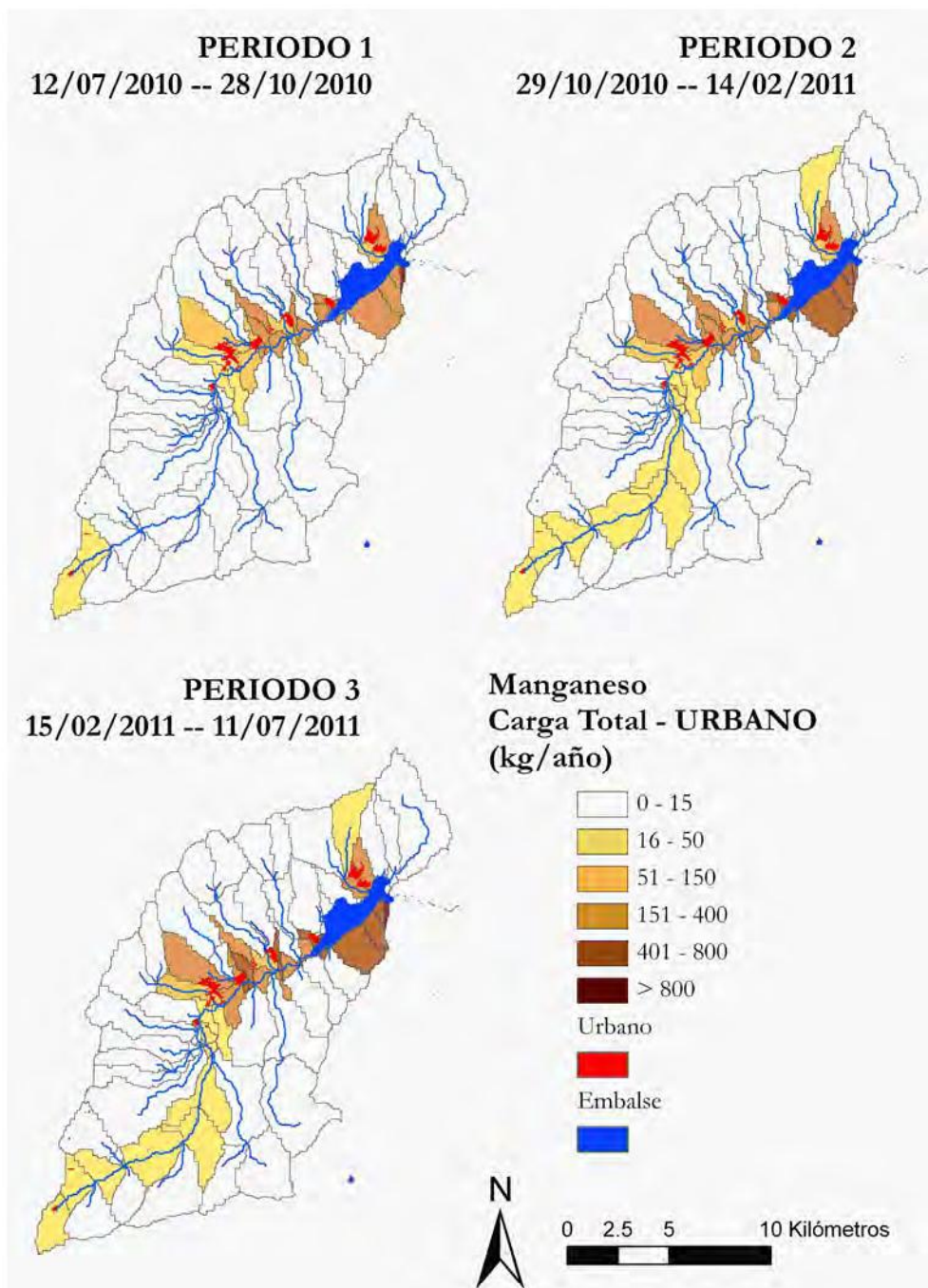
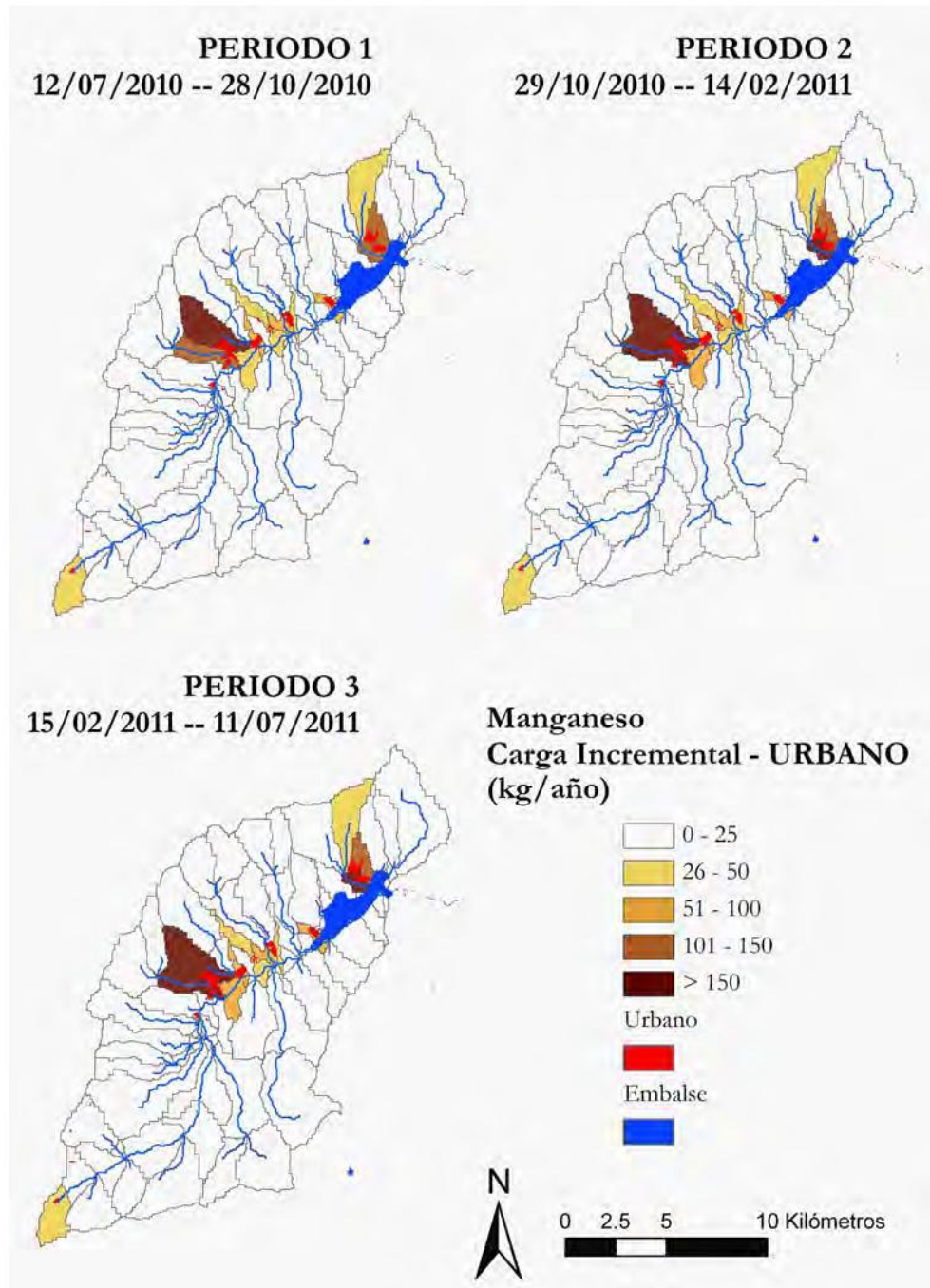


FIGURA 178. CARGA INCREMENTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA *URBANO* DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW



4.4.7. Modelo para el nitrato

Las cargas de nitrato (Figuras 179 y 180) presentan un esquema muy similar al de compuestos como el amonio, con aumento temporal y concentración a lo largo del cauce principal, e importantes incrementos en las subcuencas del río Umbría, arroyo de Santa Ana y arroyo del Villar.

La categoría de usos del suelo **ALTURA**, presenta con claridad el patrón de concentración temporal de cargas de nitrato (Figura 181), destacando los incrementos que se producen en el río Umbría, el arroyo de Santa Ana y las subcuencas en torno a "La Isla" (Figura 182).

En la categoría **PRADOS**, el aumento de cargas totales entre los periodos 2 y 3 apenas aparece marcado (Figura 183). Mientras, el patrón incremental (Figura 184) presenta al arroyo del Villar y los arroyos de Santa Ana y del Roblezo de Arriba como los principales aportes.

Por último, la categoría **URBANO** continúa con la tendencia de los anteriores compuestos, destacando los incrementos en las subcuencas que engloban el núcleo de Rascafría (Figuras 185 y 186).

FIGURA 179. CARGA TOTAL DE NITRATO MODELADA CON SPARROW

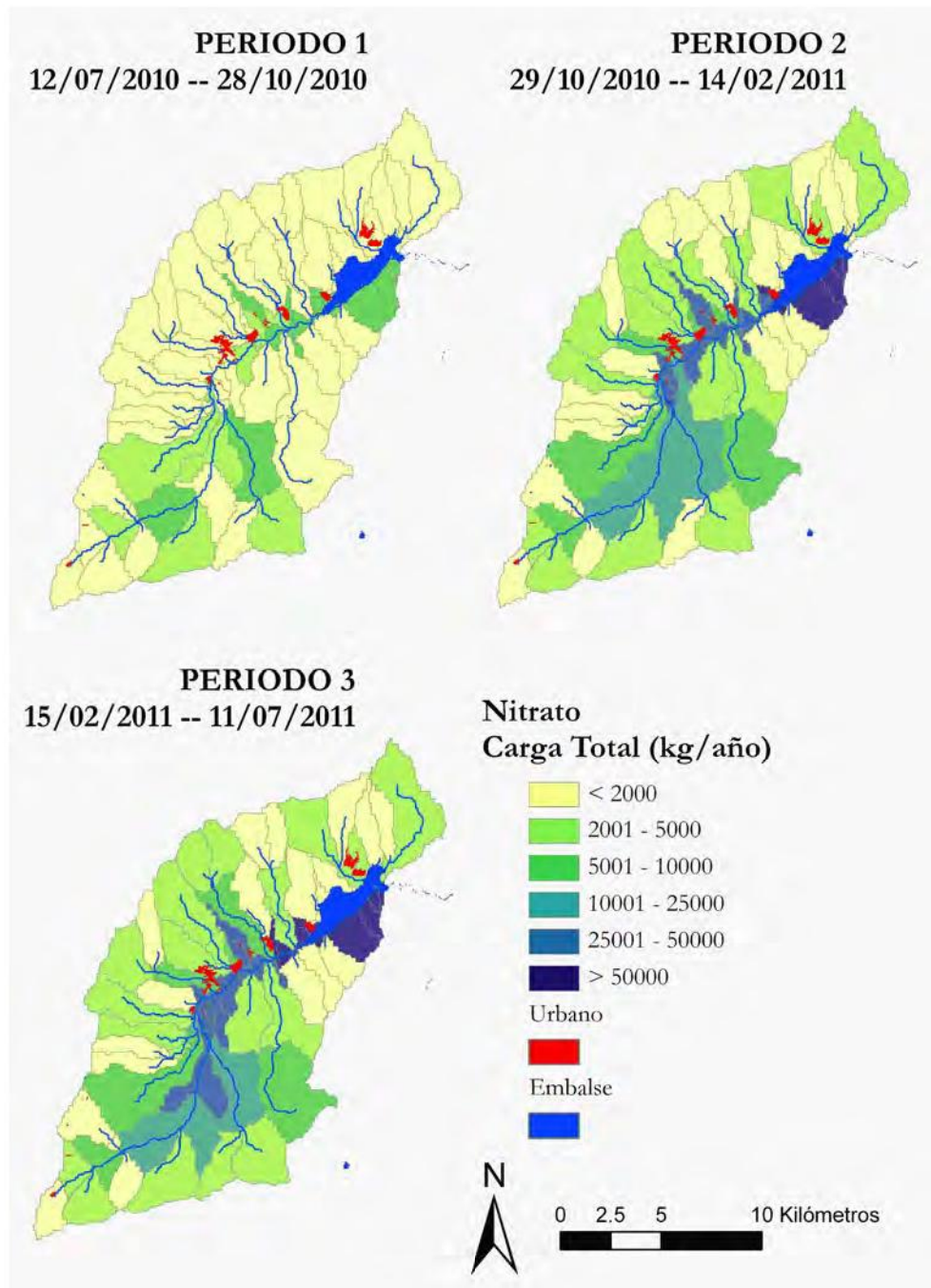


FIGURA 180. CARGA INCREMENTAL DE NITRATO MODELADA CON SPARROW

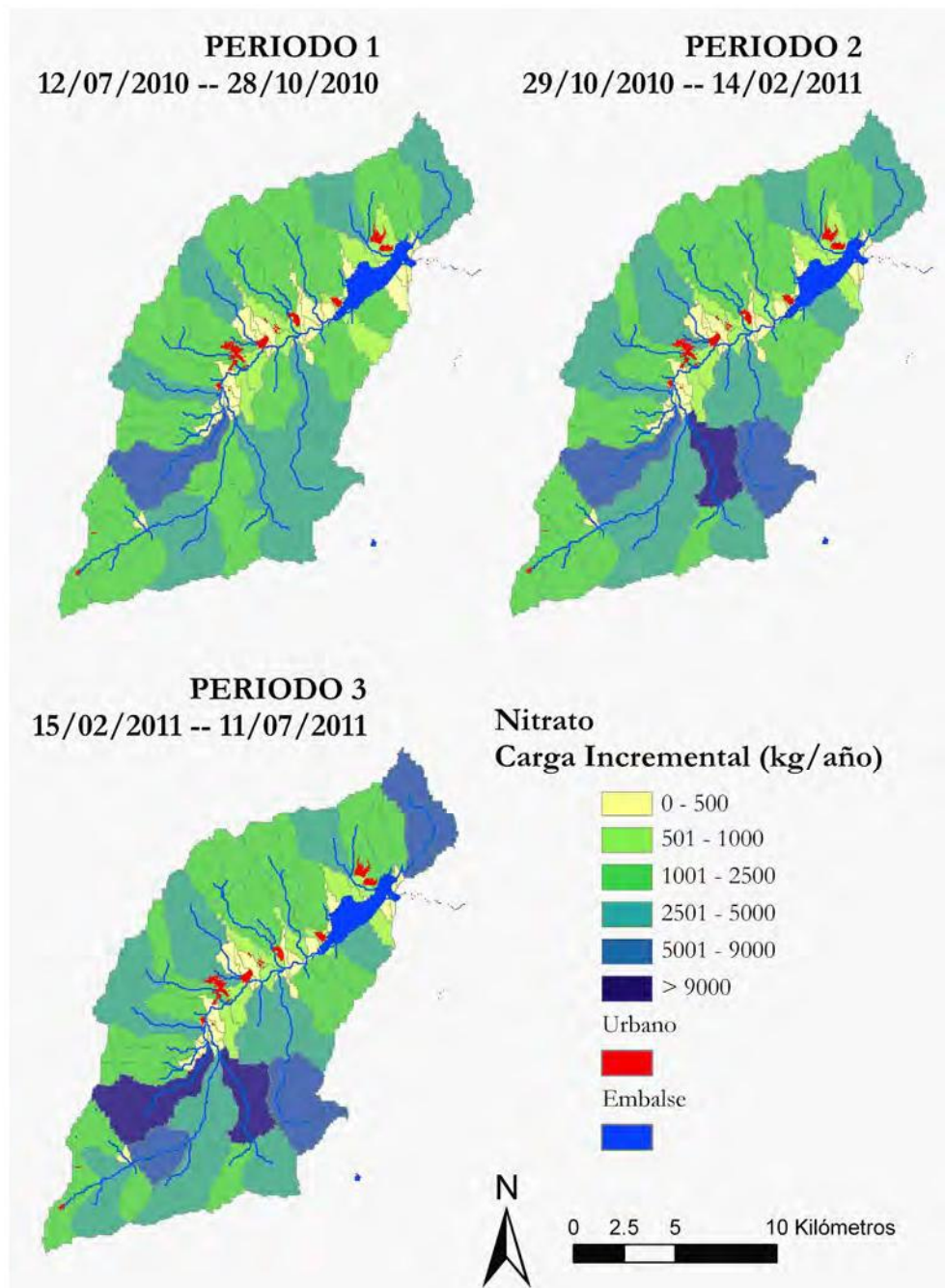


FIGURA 181. CARGA TOTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

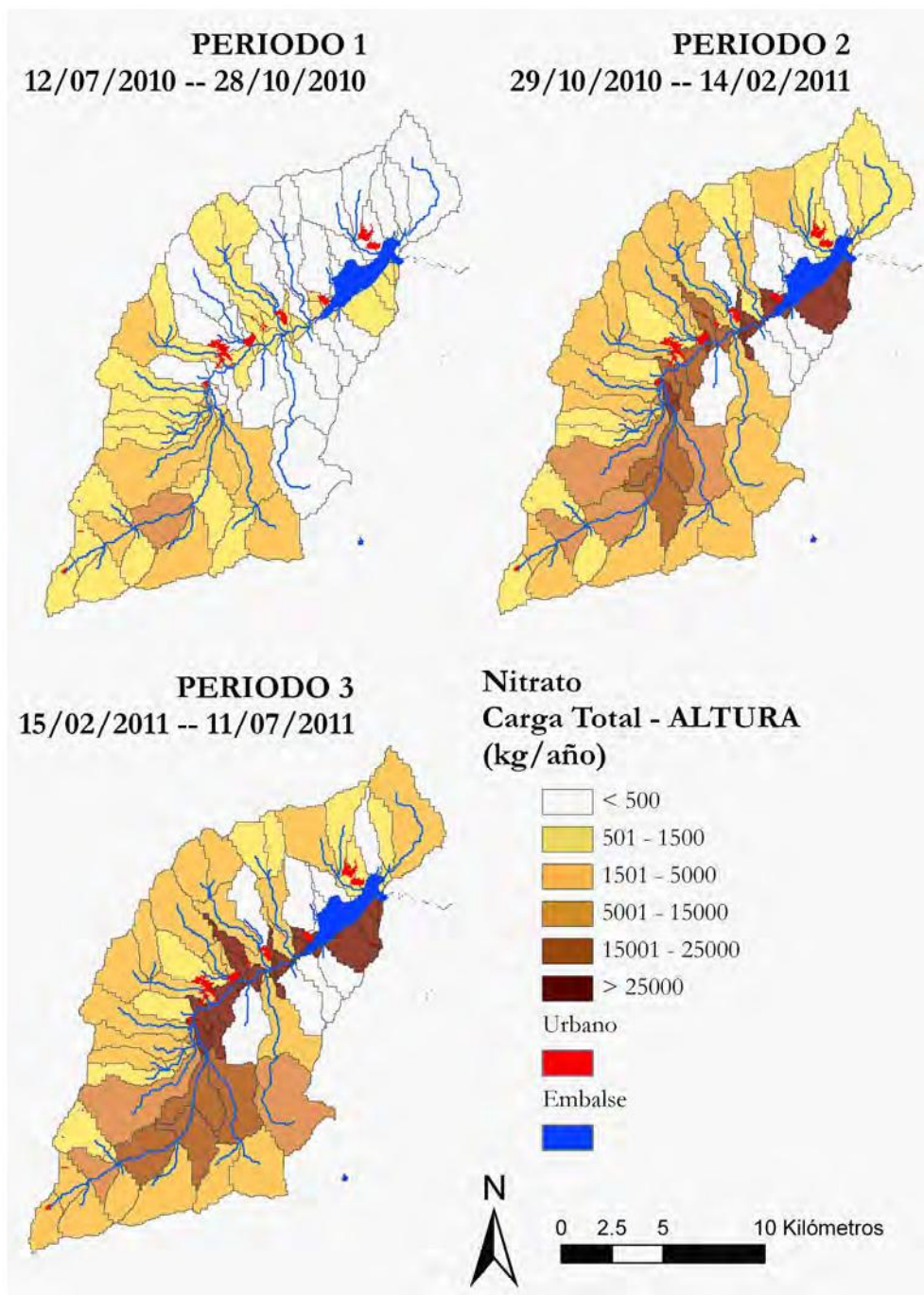


FIGURA 182. CARGA INCREMENTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

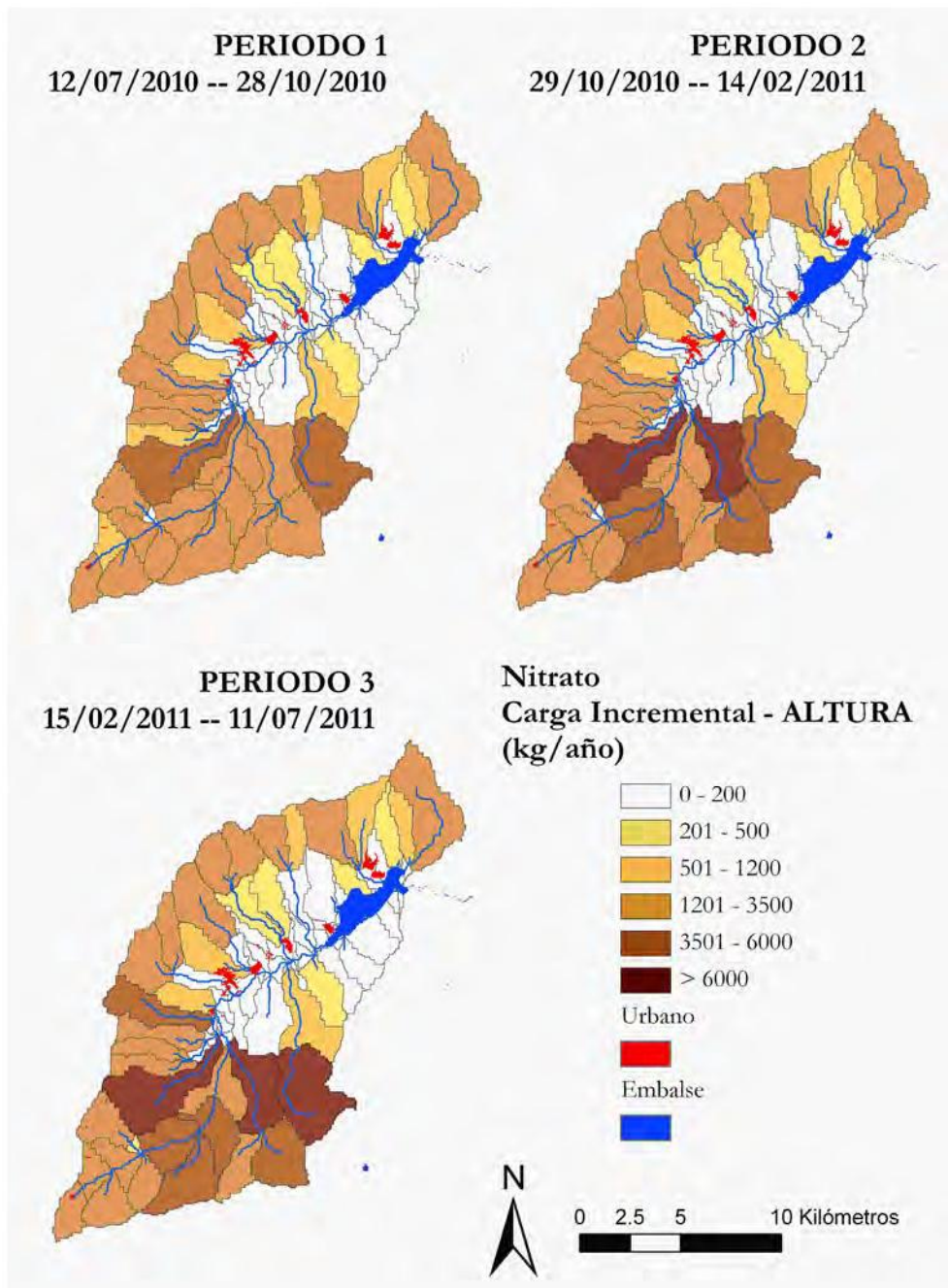


FIGURA 183. CARGA TOTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

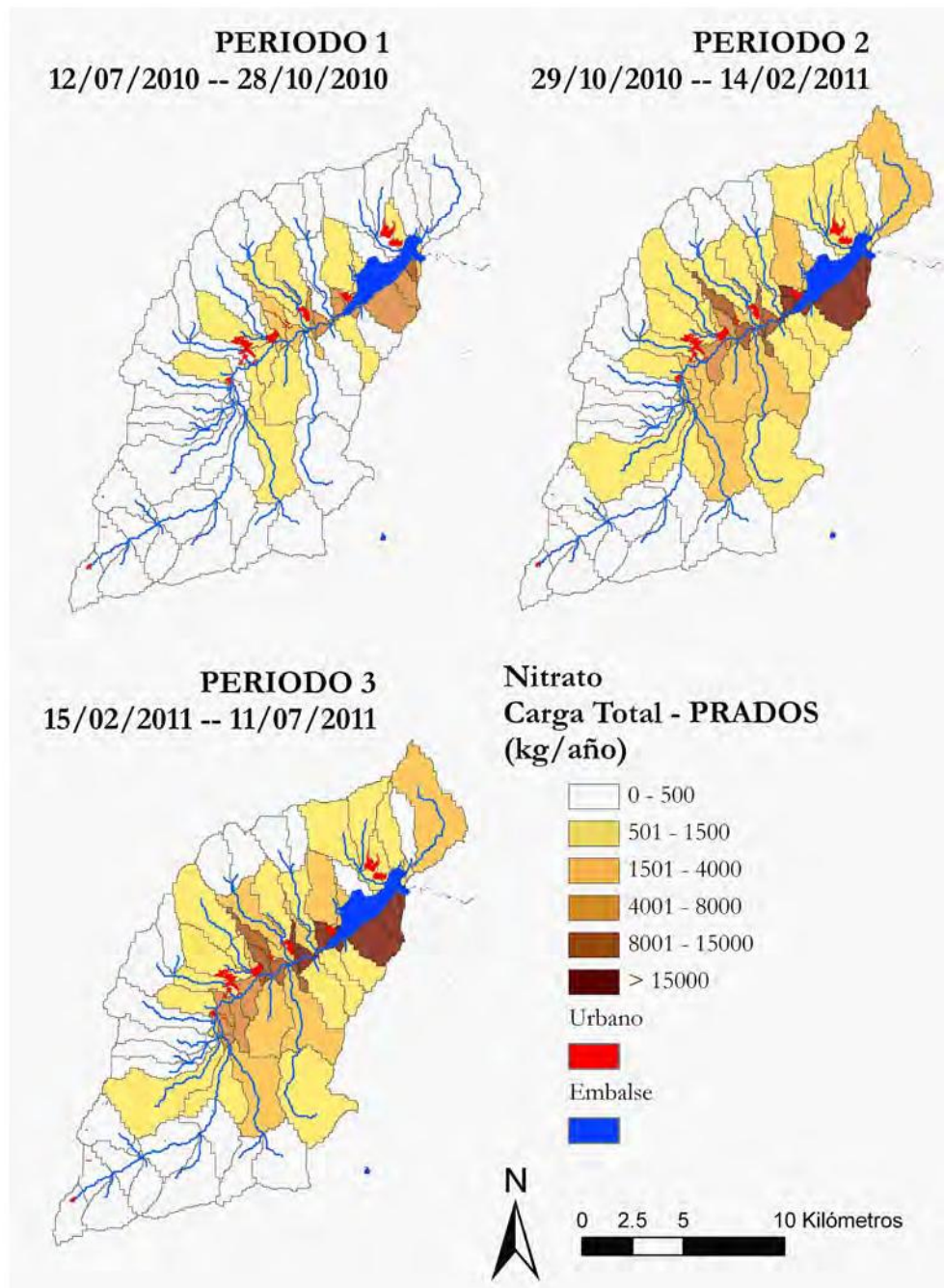


FIGURA 184. CARGA INCREMENTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

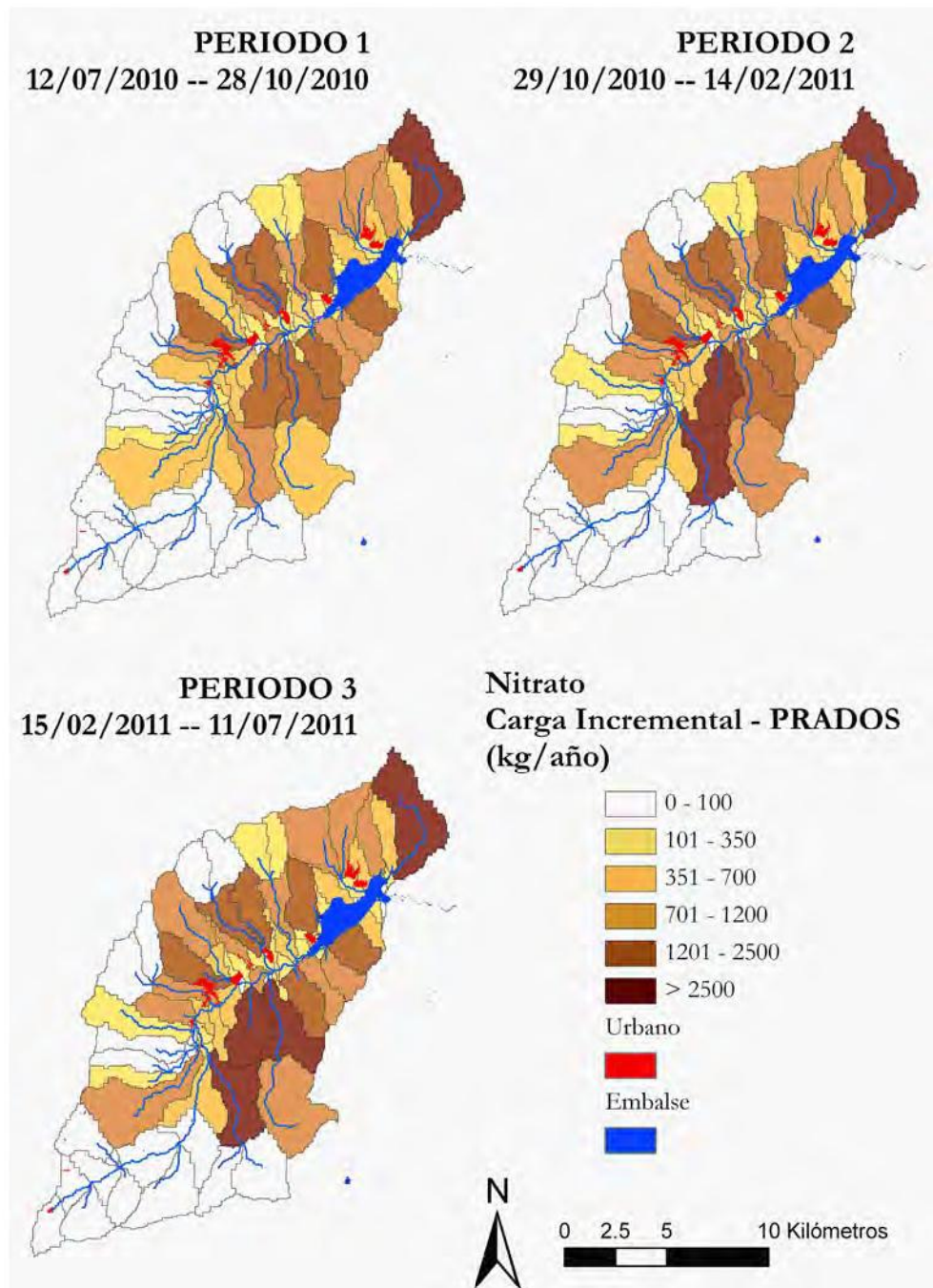


FIGURA 185. CARGA TOTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA *URBANO* DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

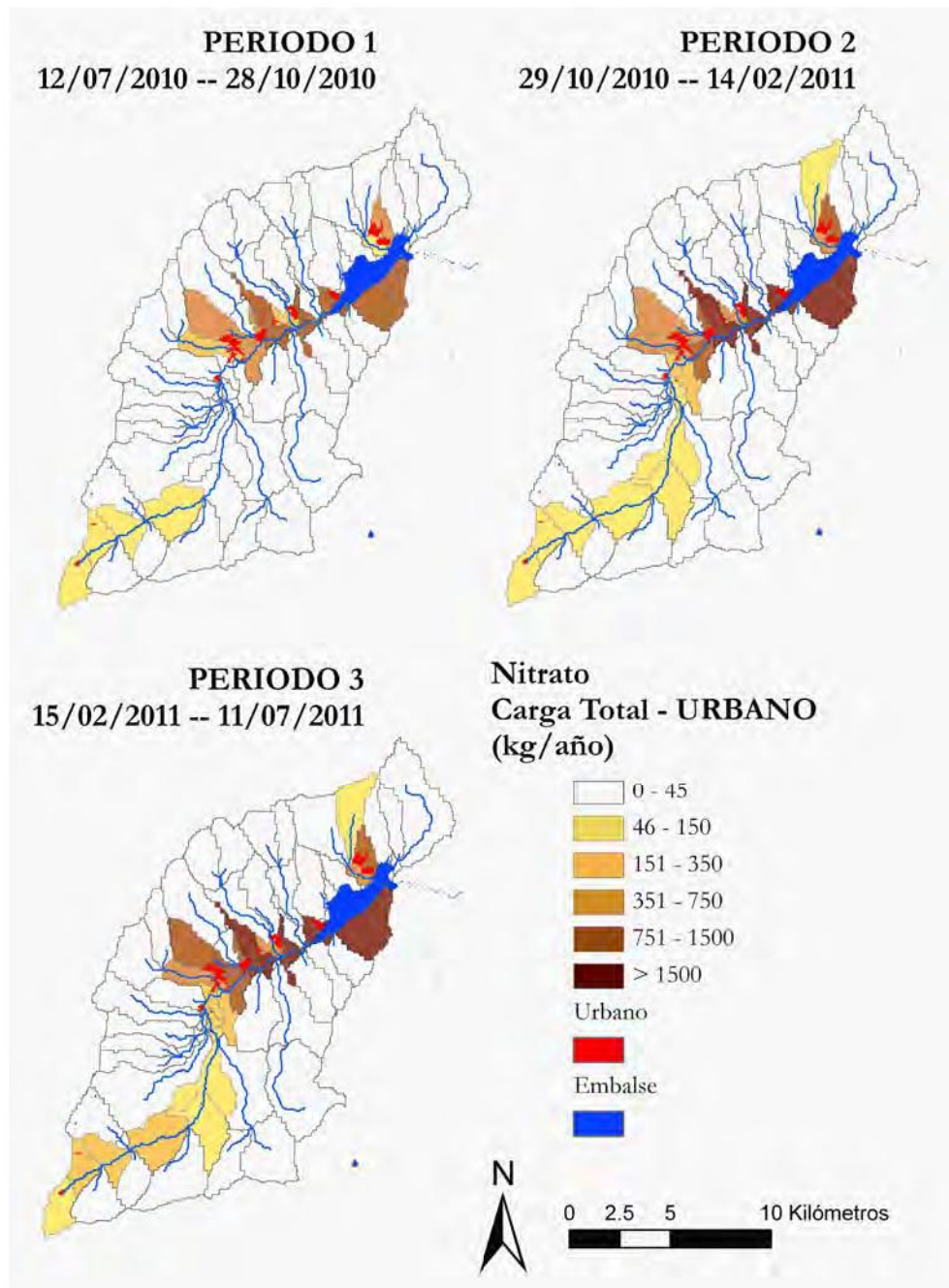
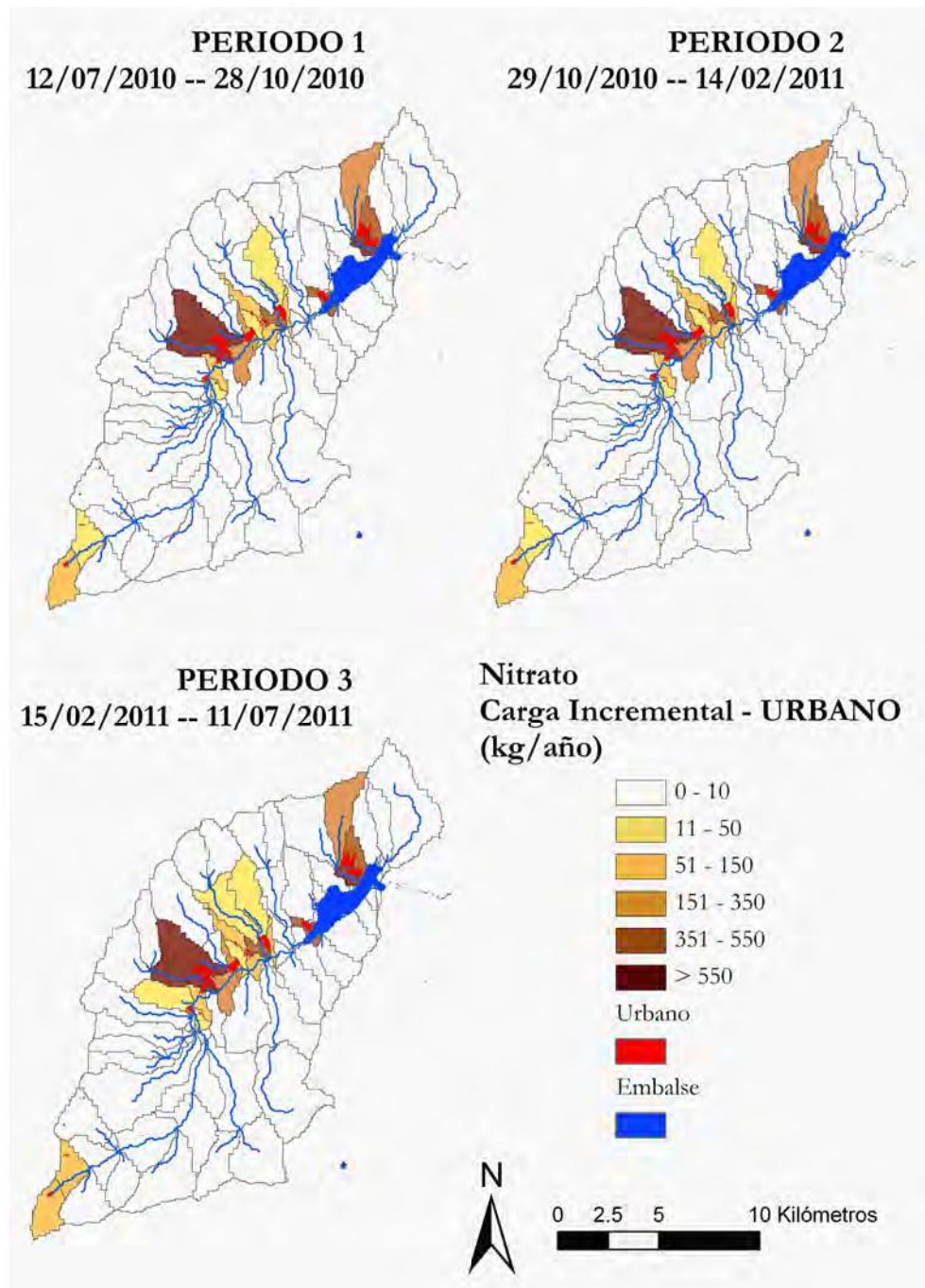


FIGURA 186. CARGA INCREMENTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW



4.4.8. Modelo para el nitrógeno total

Las cargas de nitrógeno total siguen la misma línea del aumento temporal (Figura 187), si bien el patrón de incrementos aparece bastante repartido por toda la cuenca, con el río Umbría como el principal aporte (Figura 188).

La categoría de usos del suelo **ALTURA** presenta un discreto incremento de la carga total de nitrógeno total (Figura 189) entre los periodos 2 y 3; y unos incrementos distribuidos por las subcuencas de cabecera, entre las que destacan el río Umbría, el arroyo de Santa Ana y "la Isla" (Figura 190).

Las cargas totales de nitrógeno total asociadas a la categoría **PRADOS** no son muy elevadas, encontrándose muy reducidas durante el periodo 1 (Figura 191). Entre los incrementos más destacados repiten el arroyo del Villar y el de Santa Ana (Figura 192).

En la categoría **URBANO**, lo más destacable es la influencia que ejerce Valdesquí en las cargas totales durante los periodos 2 y 3 (Figura 193); respecto a los incrementos (Figura 194), a los núcleos de Rascafría y Lozoya, se unen los aportes durante el periodo 2 en las subcuencas más pequeñas que rodean Oteruelo, Alameda y Pinilla.

FIGURA 187. CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL MODELADA CON SPARROW

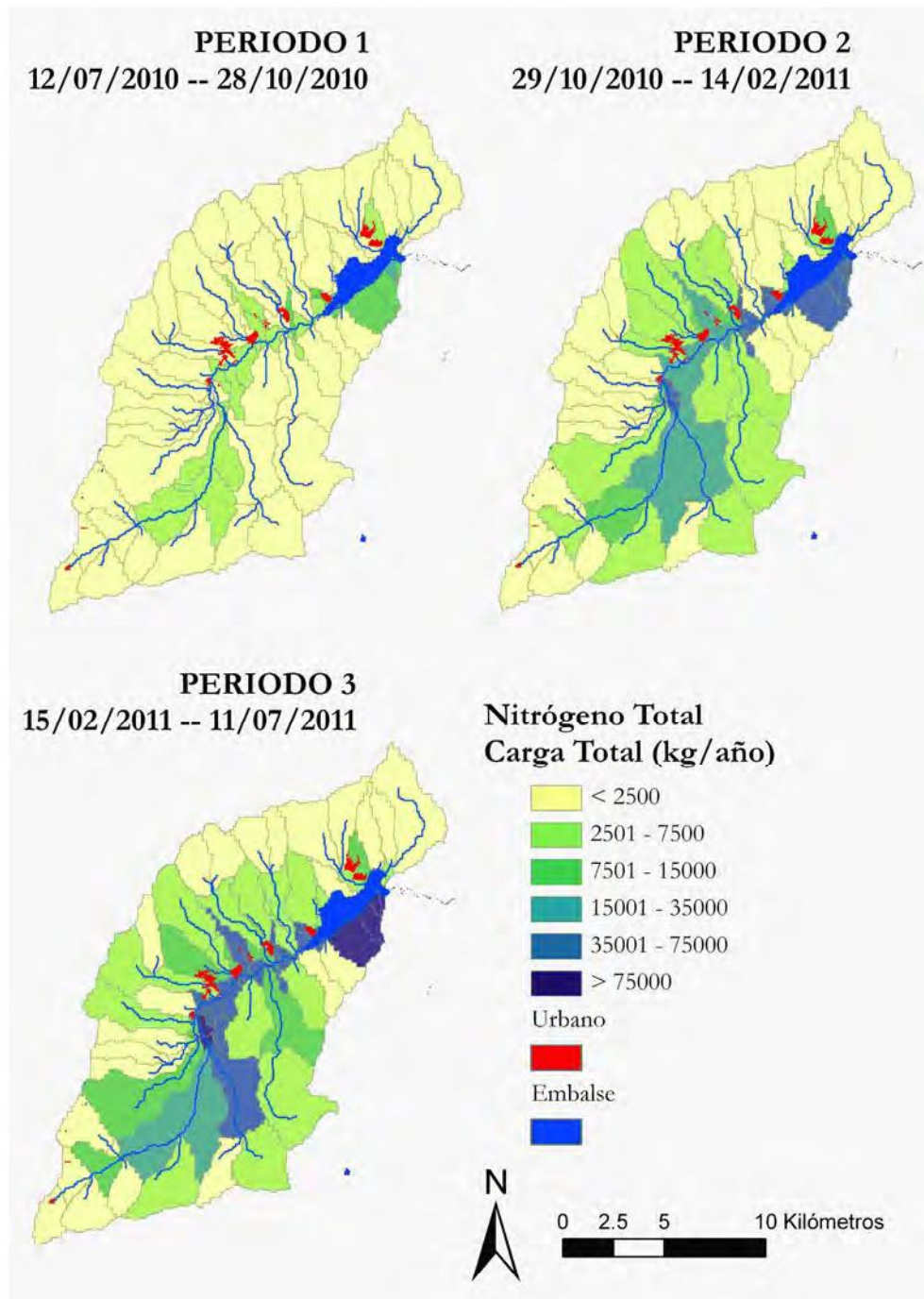


FIGURA 188. CARGA INCREMENTAL DE NITRÓGENO TOTAL MODELADA CON SPARROW

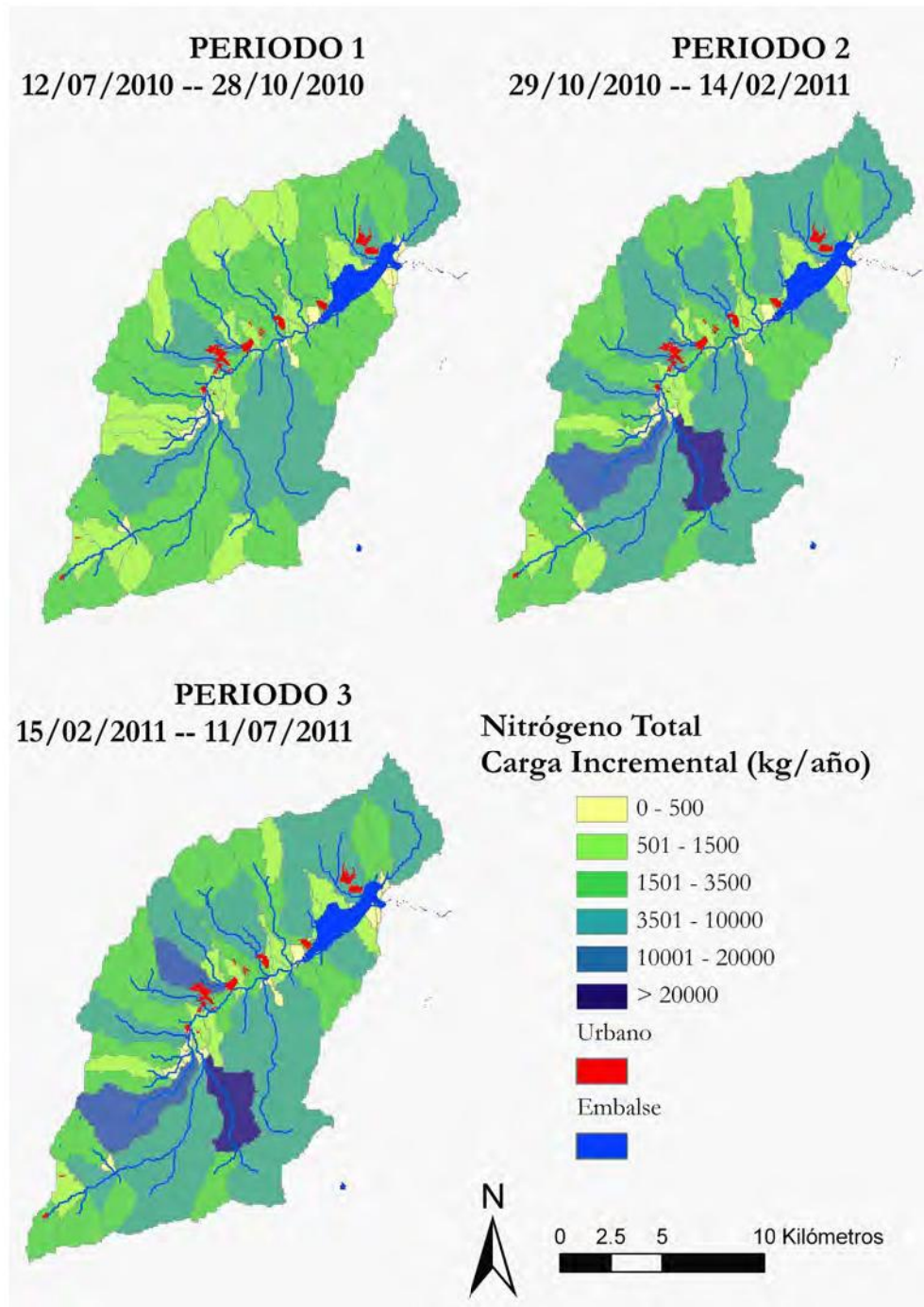


FIGURA 189. CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

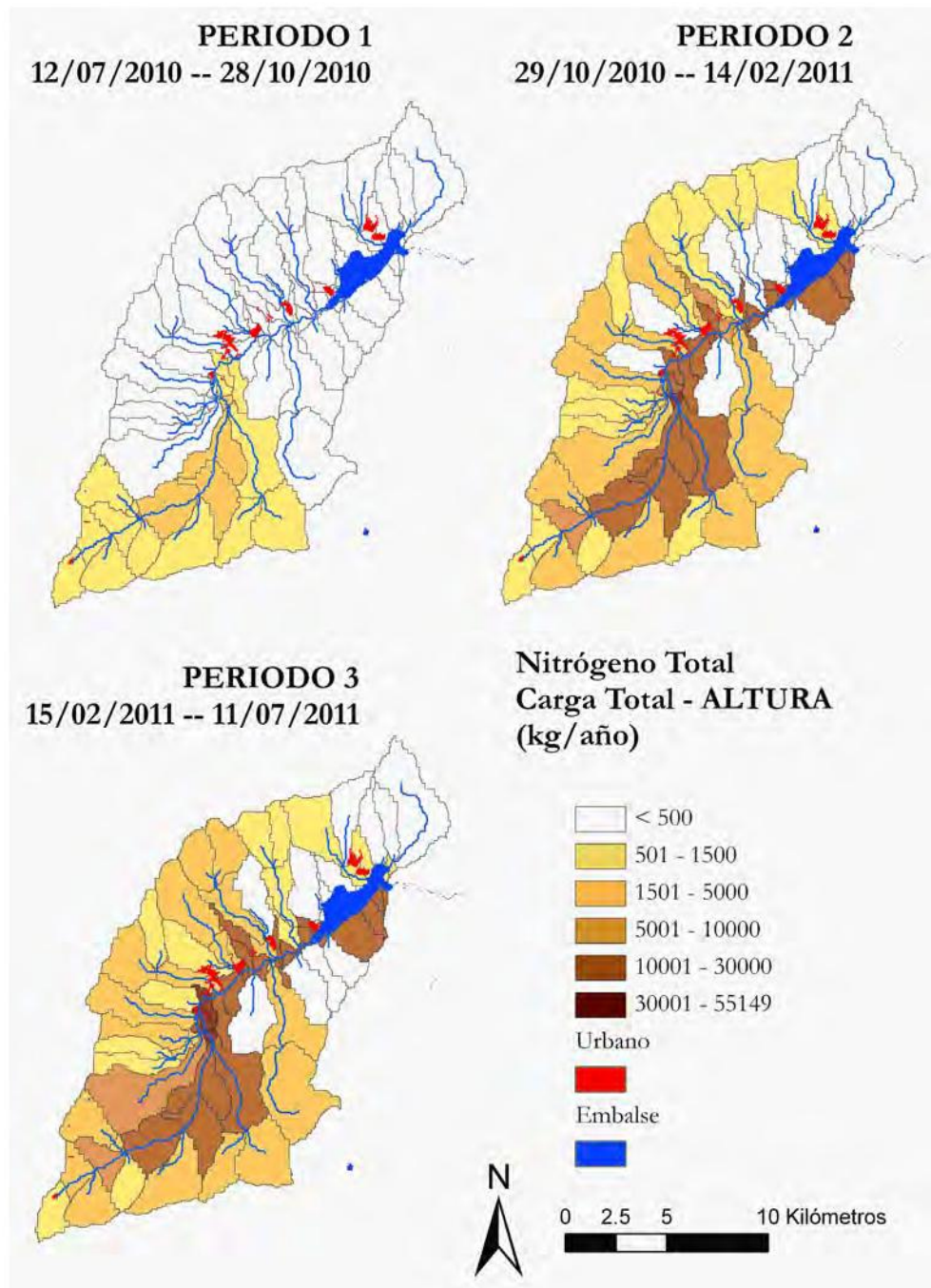


FIGURA 190. CARGA INCREMENTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

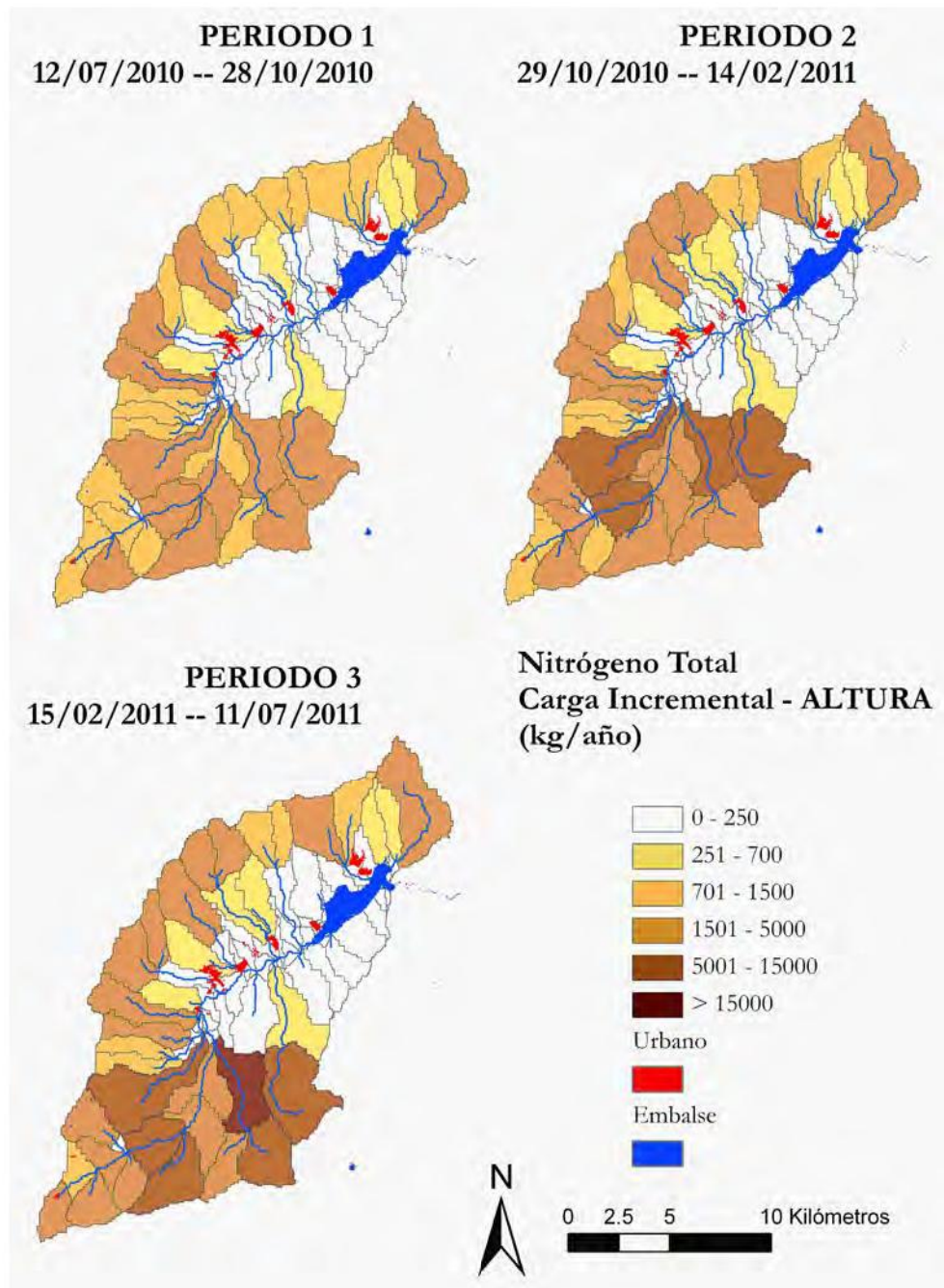


FIGURA 191. CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

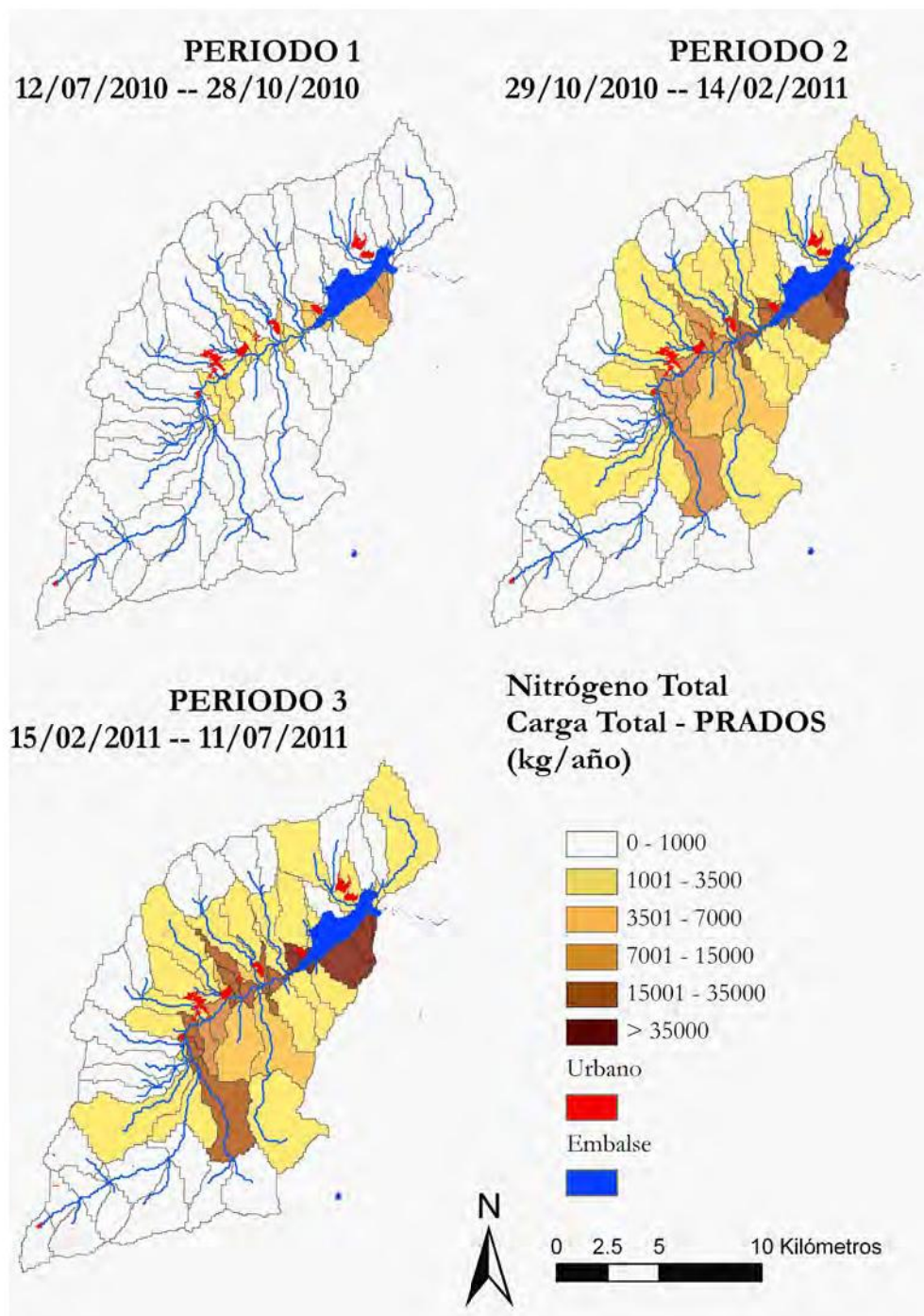


FIGURA 192. CARGA INCREMENTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

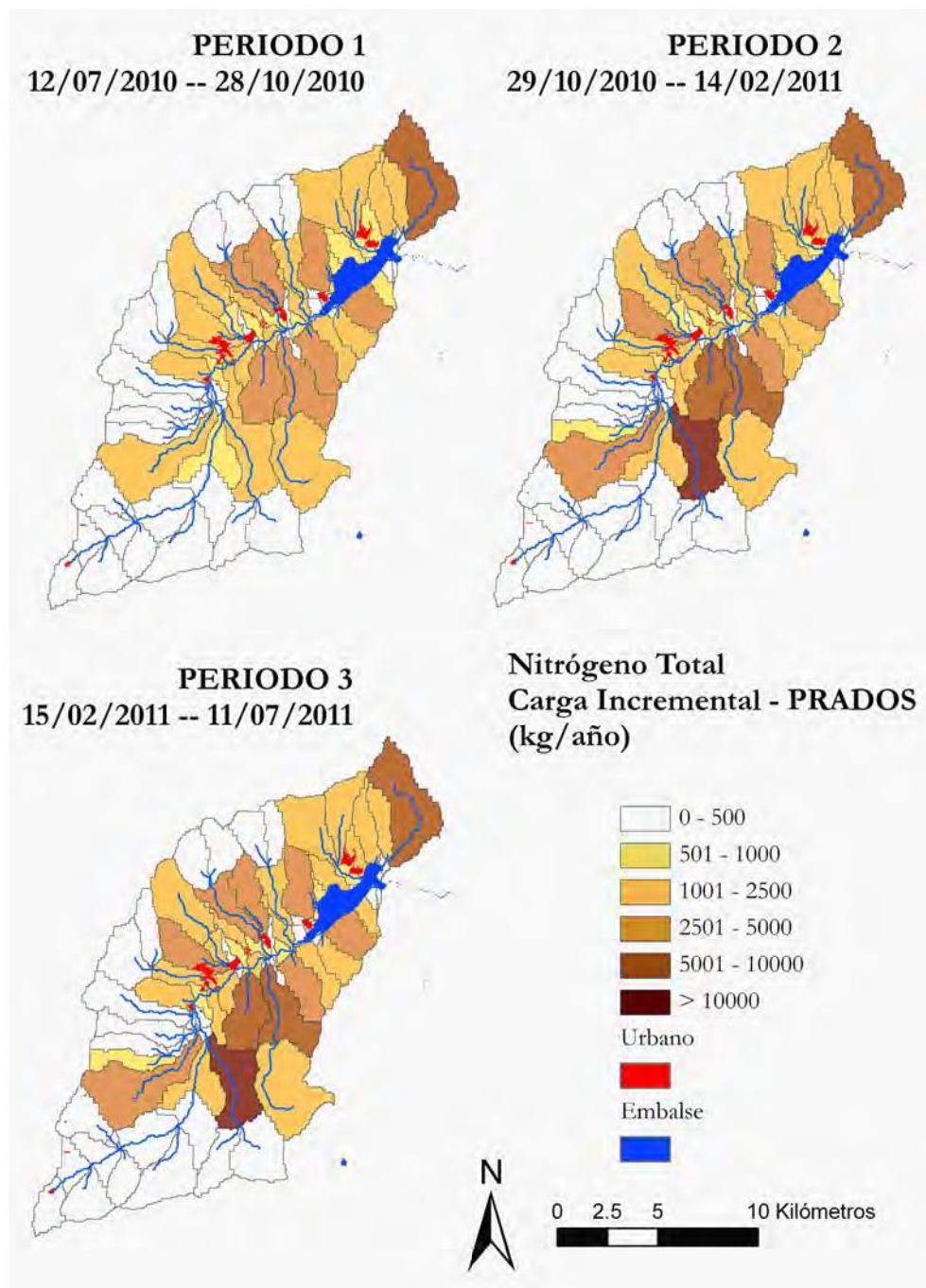


FIGURA 193. CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA *URBANO* DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

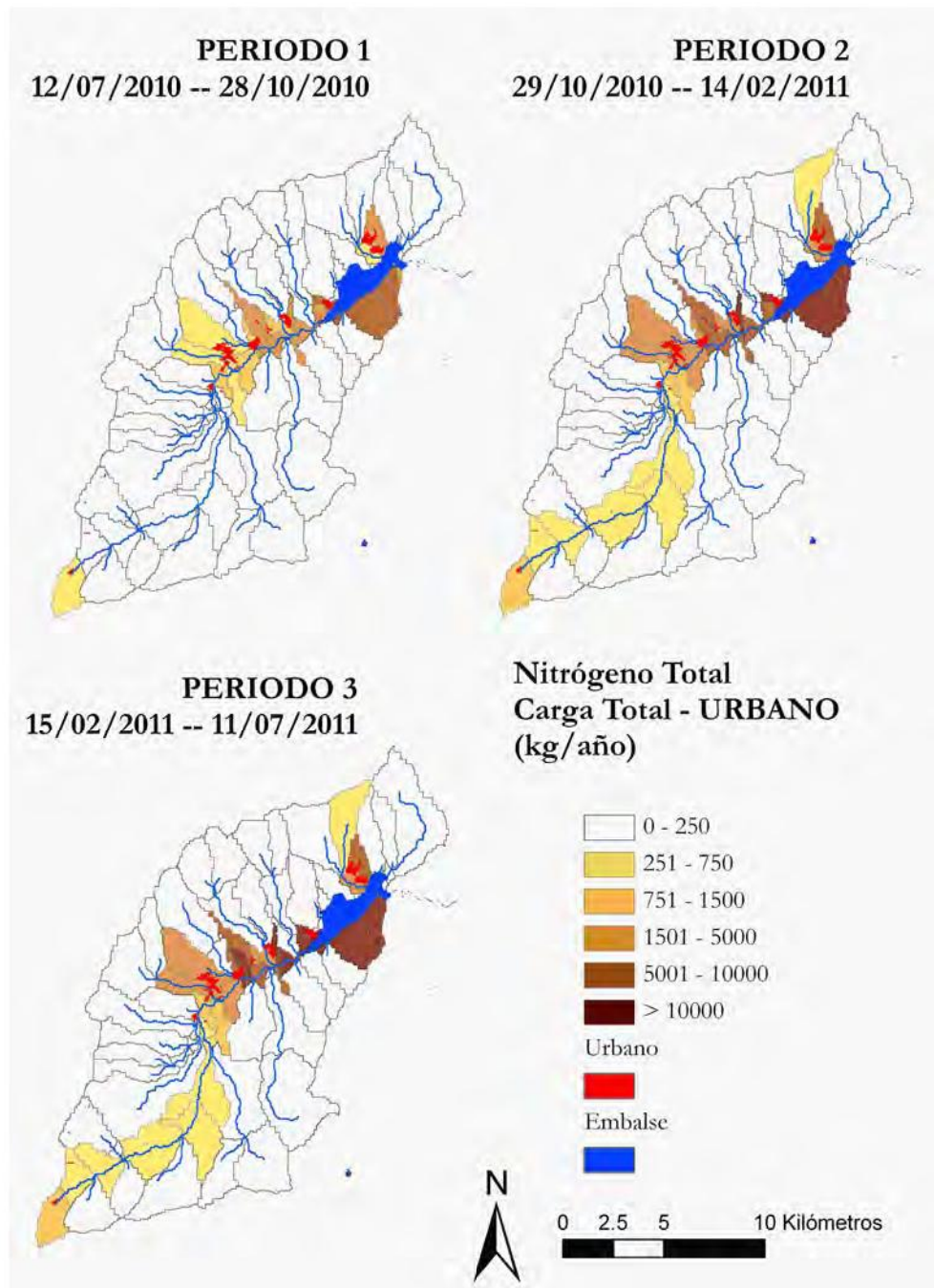
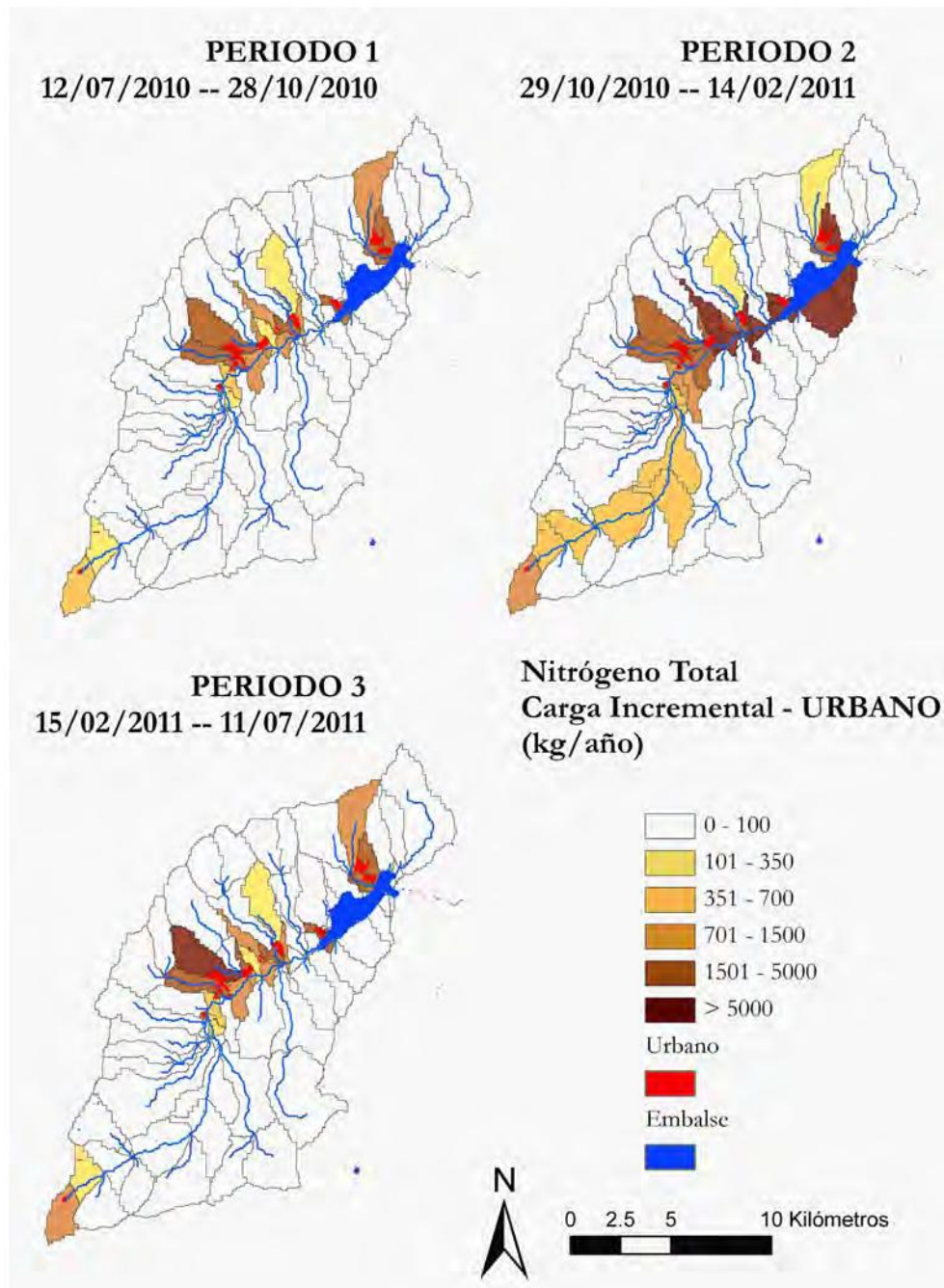


FIGURA 194. CARGA INCREMENTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA *URBANO* DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW



4.4.9. Modelo para el fósforo total

Las cargas de fósforo total se concentran en torno al eje principal y en alguna cabecera de afluentes, de la margen derecha e izquierda (Figura 195). Se producen los incrementos más importantes (Figura 196) en la subcuenca que engloba la EDAR, seguida del río Umbría, arroyo del Villar, de Santa Ana, o de las zonas en torno a Rascafría y a “La Isla”.

Las categoría de usos del suelo **ALTURA** repite el patrón del incremento temporal (Figura 197), con incrementos localizados en las cuencas de cabecera, más concretamente en el arroyo de Santa Ana, el río Umbría y las subcuencas cercanas a “La Isla” (Figura 198).

En la categoría de usos del suelo **PRADOS**, aparte del leve incremento temporal entre los periodos 2 y 3 (Figura 199), de nuevo es el arroyo del Villar el que experimenta el principal incremento en este apartado (Figura 200).

Los núcleos urbanos de Rascafría y Lozoya vuelven a ser los más importantes en las cargas de Fósforo Total asociadas al uso del suelo caracterizado como **URBANO**; mientras que la influencia de la estación de Valdesquí se hace presente en el resto de la cuenca durante los periodos 2 y 3 (Figuras 201 y 202).

FIGURA 195. CARGA TOTAL DE FÓSFORO TOTAL MODELADA CON SPARROW

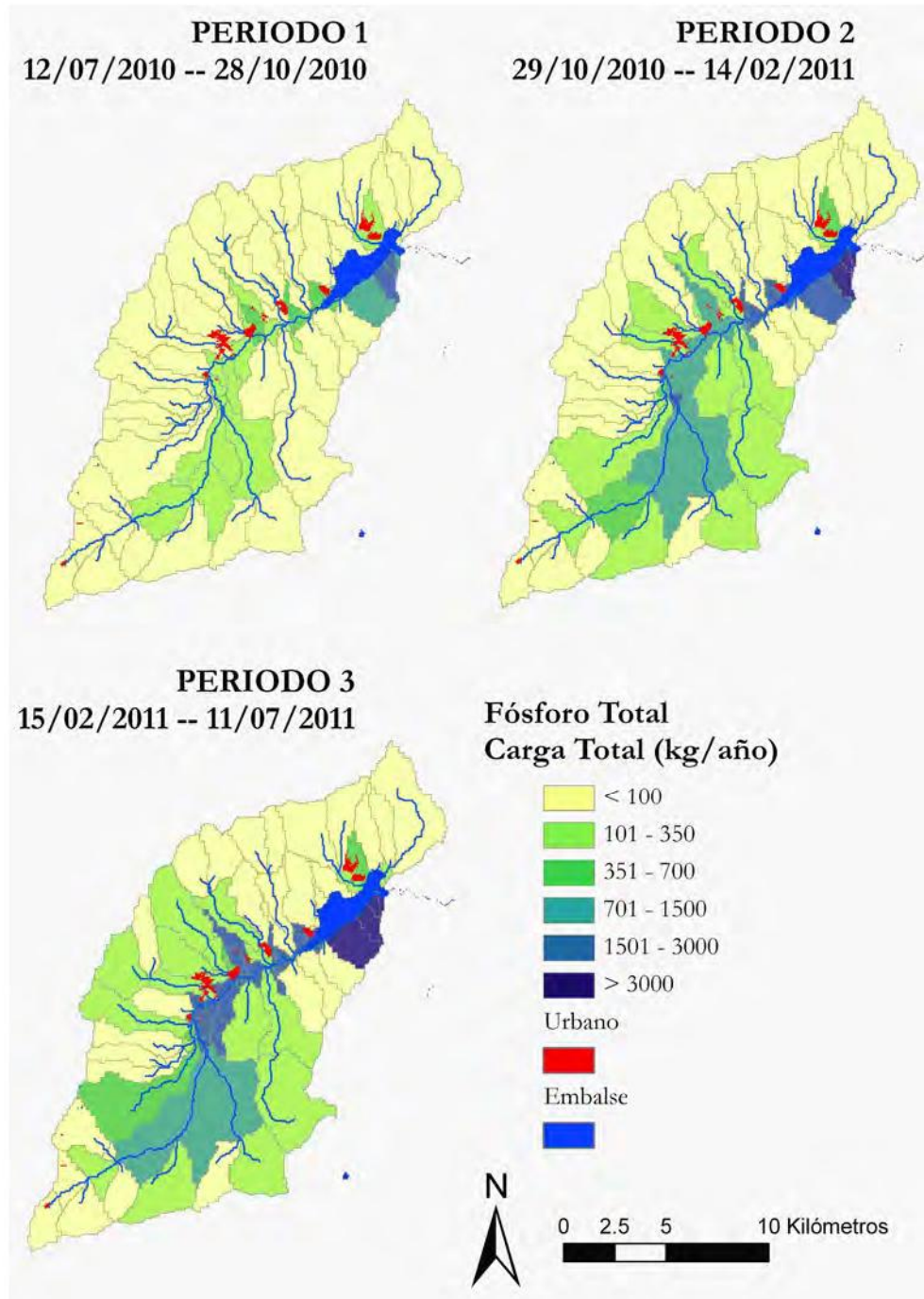


FIGURA 196. CARGA INCREMENTAL DE FÓSFORO TOTAL MODELADA CON SPARROW

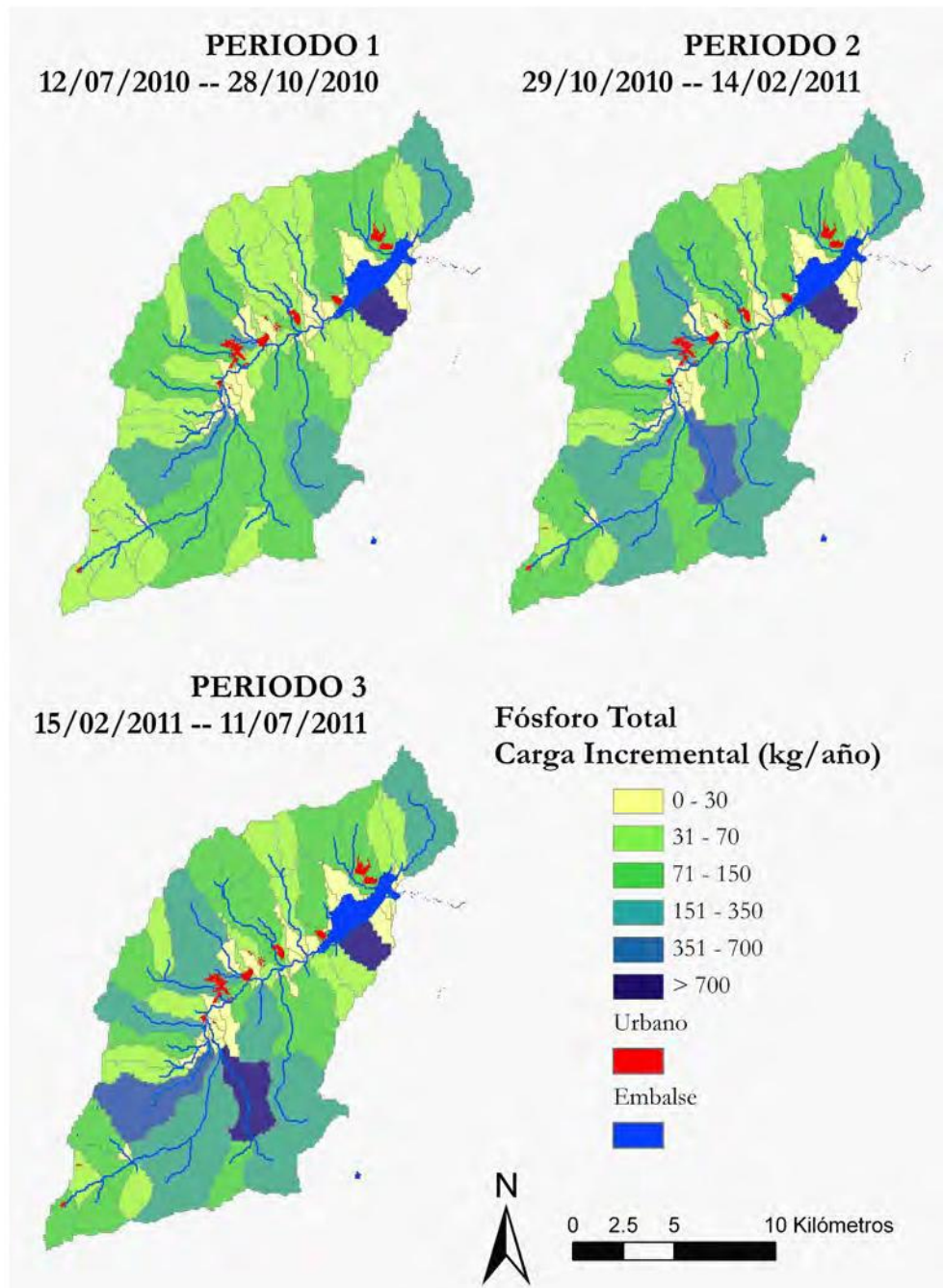


FIGURA 197. CARGA TOTAL DE FÓSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

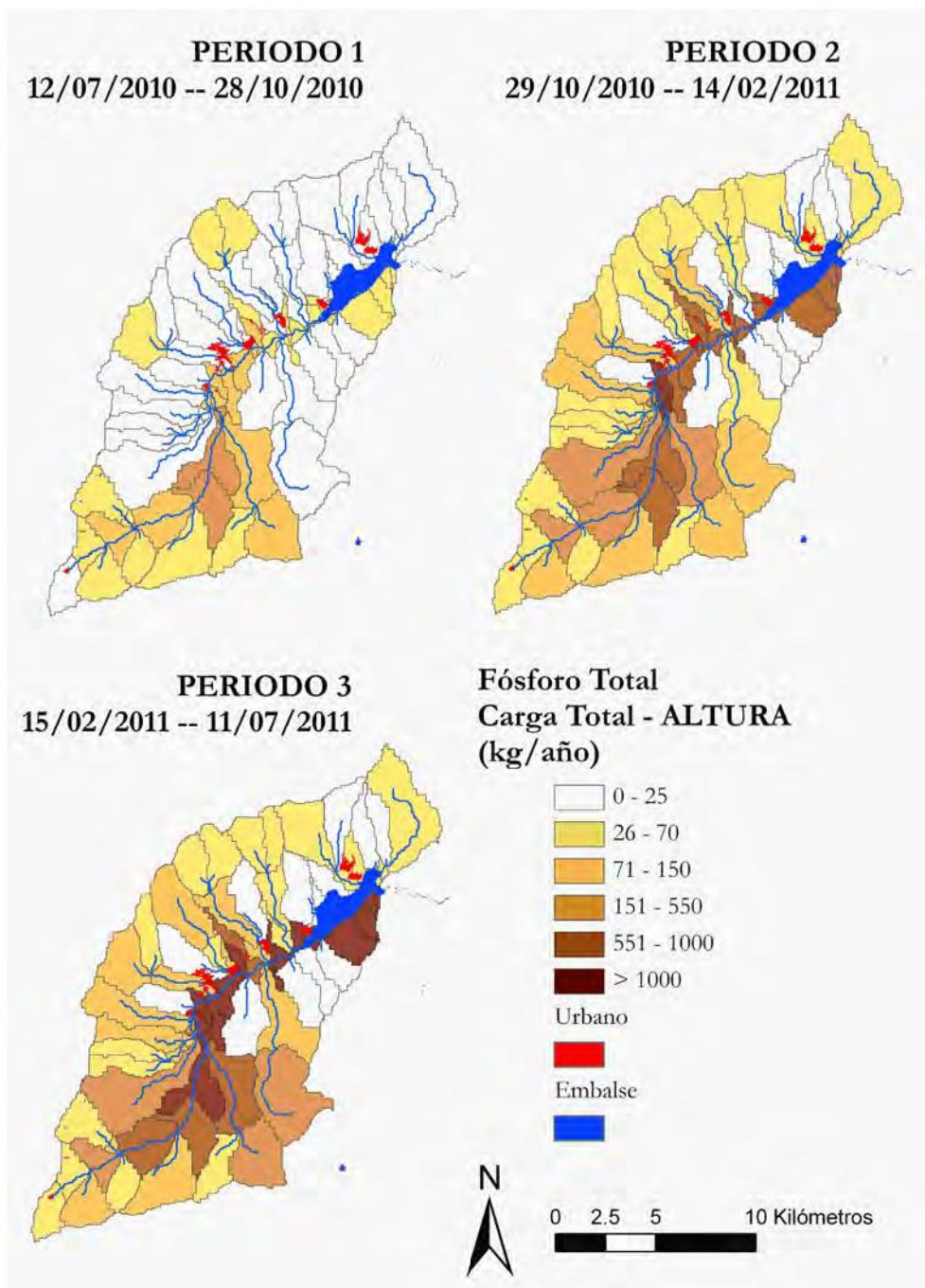


FIGURA 198. CARGA INCREMENTAL DE FÓSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

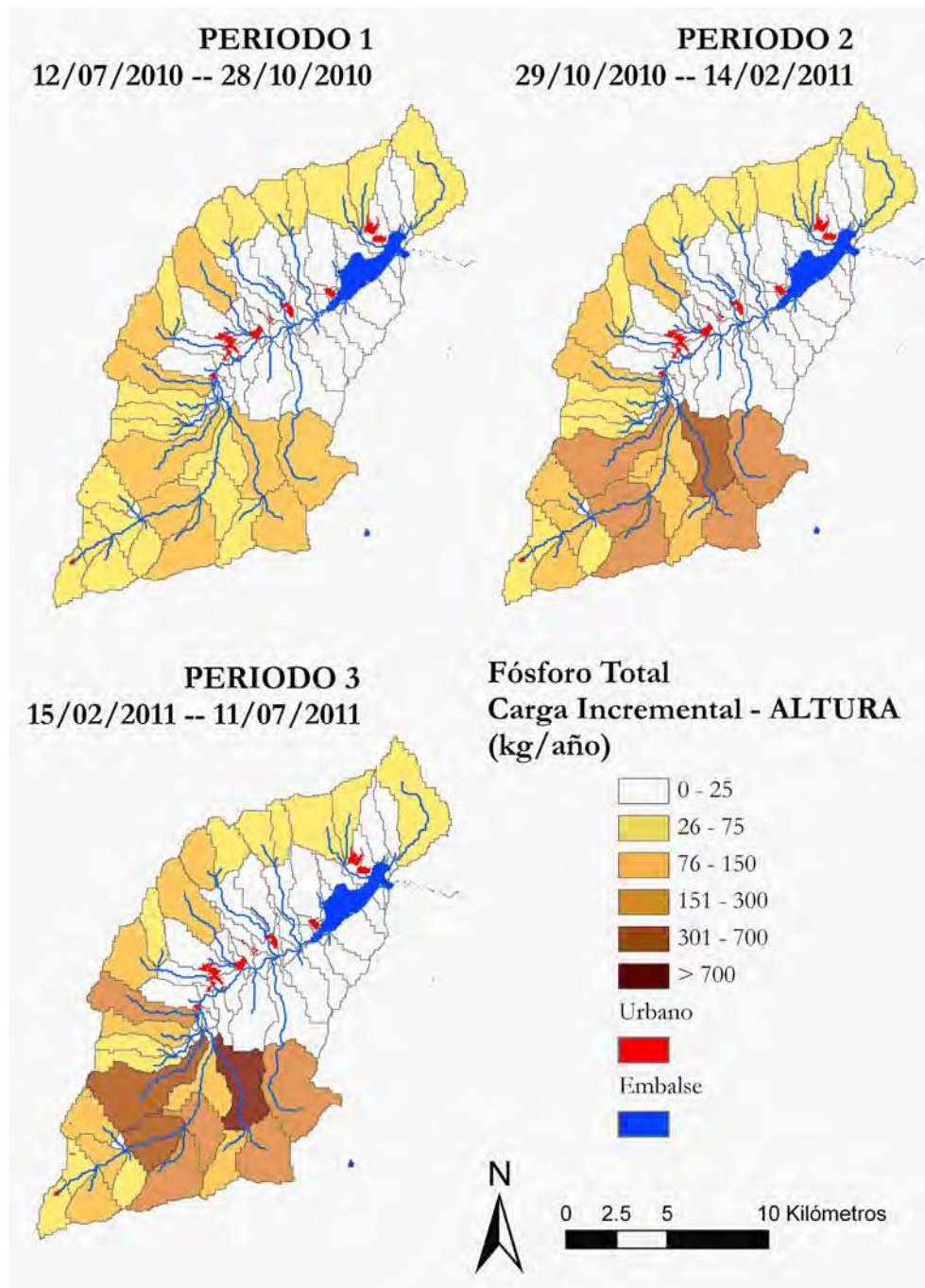


FIGURA 199. CARGA TOTAL DE FÓSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

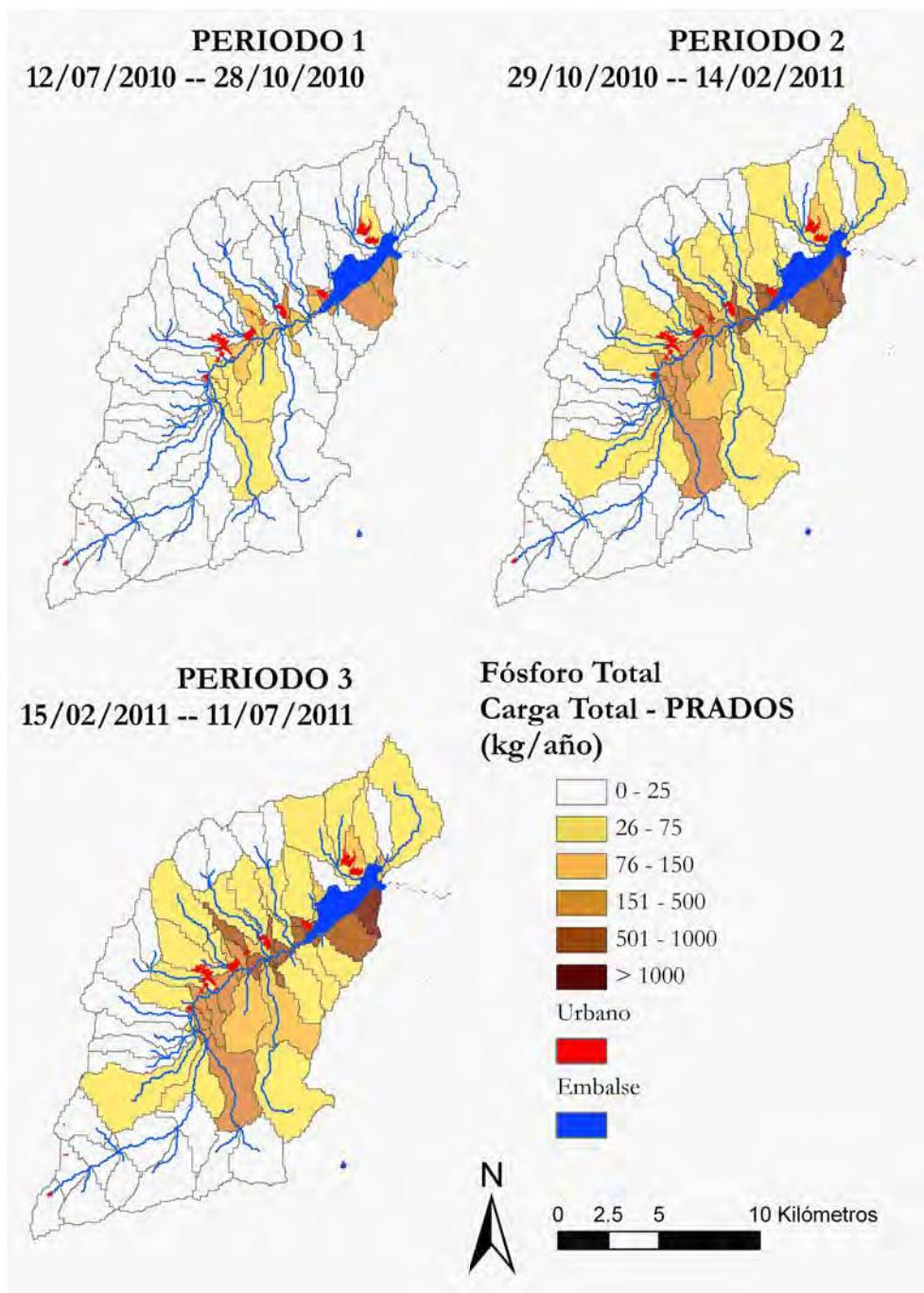


FIGURA 200. CARGA INCREMENTAL DE FÓSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

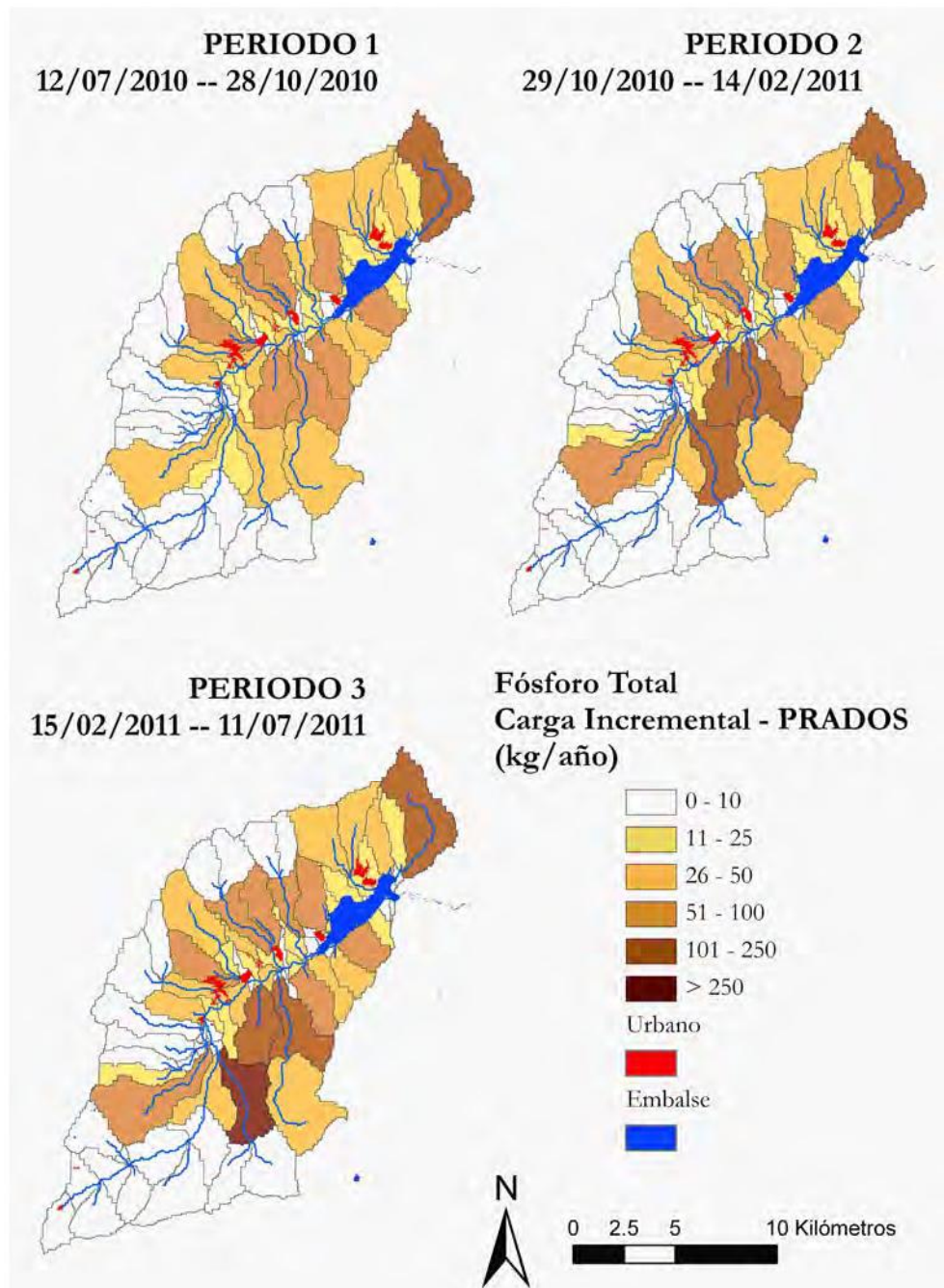


FIGURA 201. CARGA TOTAL DE FÓSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

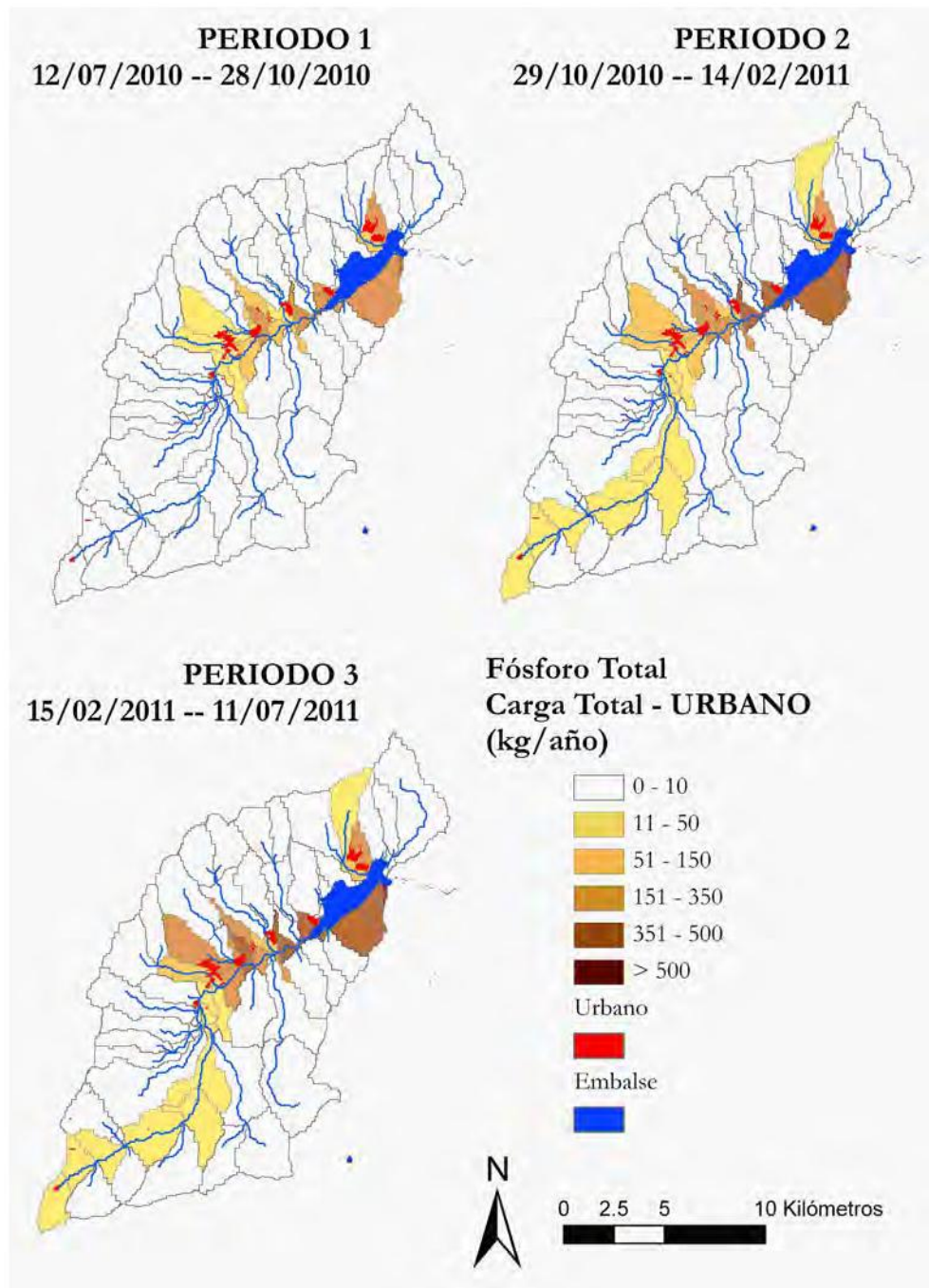
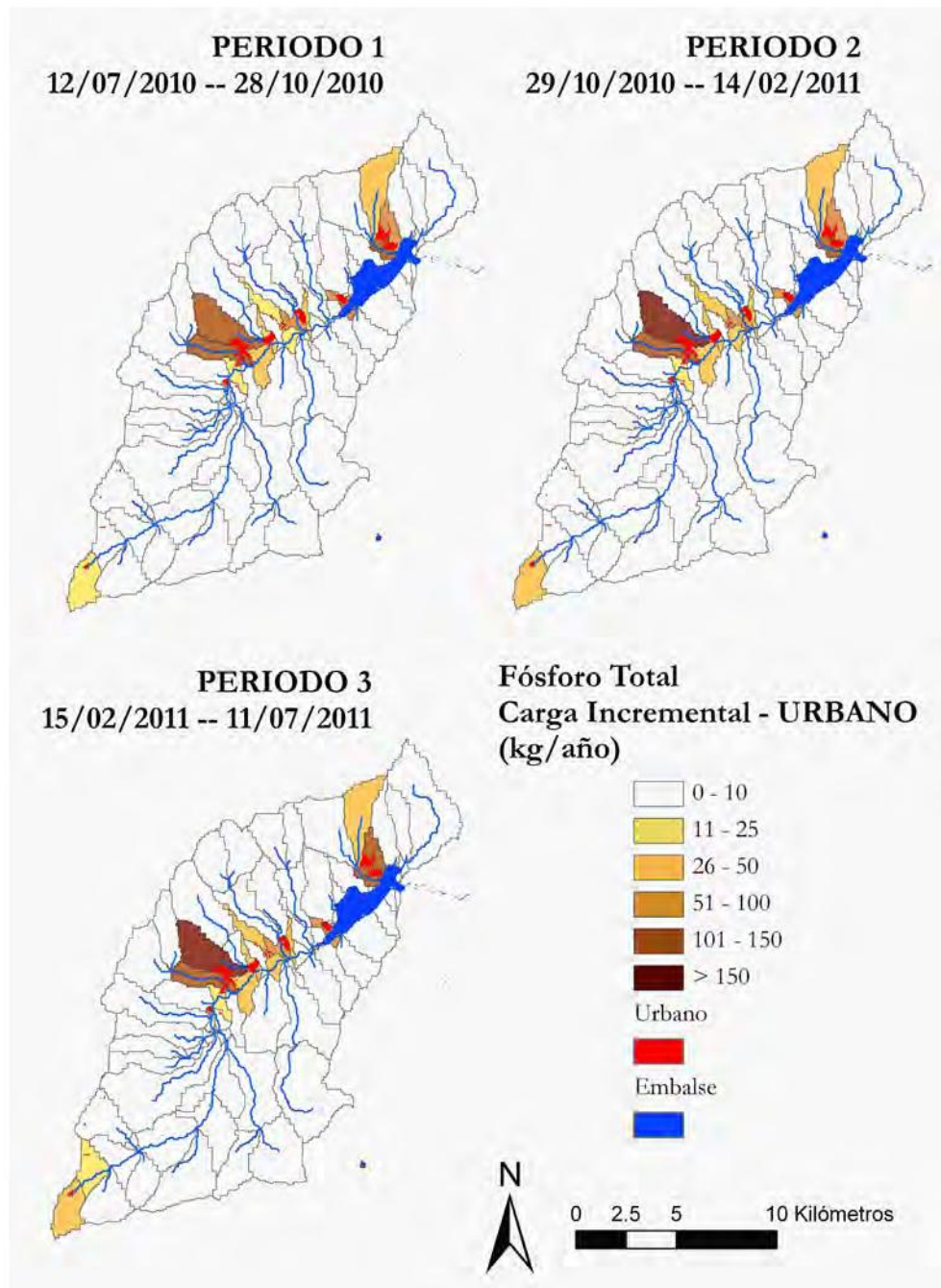


FIGURA 202. CARGA INCREMENTAL DE FÓSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA *URBANO* DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW



4.4.10. Modelo para el silicato

En las cargas de SiO_2 , aparte del aumento temporal, destacan los incrementos localizados en la subcuenca del arroyo del Villar, del río Umbría y del arroyo de Santa Ana (Figuras 203 y 204).

En la categoría de usos de suelo **ALTURA**, los incrementos de las cargas de SiO_2 se concentran en cabecera, en torno a las subcuencas de “La Isla”, el río Umbría y el arroyo de Santa Ana (Figura 205 y Figura 206).

En la categoría de usos de suelo **PRADOS**, se repite el bajo incremento de la carga total de SiO_2 entre los periodos 2 y 3 (Figura 207); siendo los principales incrementos los del arroyo del Villar y el arroyo de Santa Ana (Figura 208).

En las cargas de SiO_2 asociadas a la categoría de usos de suelo **URBANO** el aumento entre periodos es poco perceptible (Figura 209). En los incrementos de las cargas de SiO_2 vuelven a ser las subcuencas de Rascafría y Lozoya las más destacadas (Figura 210).

FIGURA 203. CARGA TOTAL DE SÍLICE MODELADA CON SPARROW

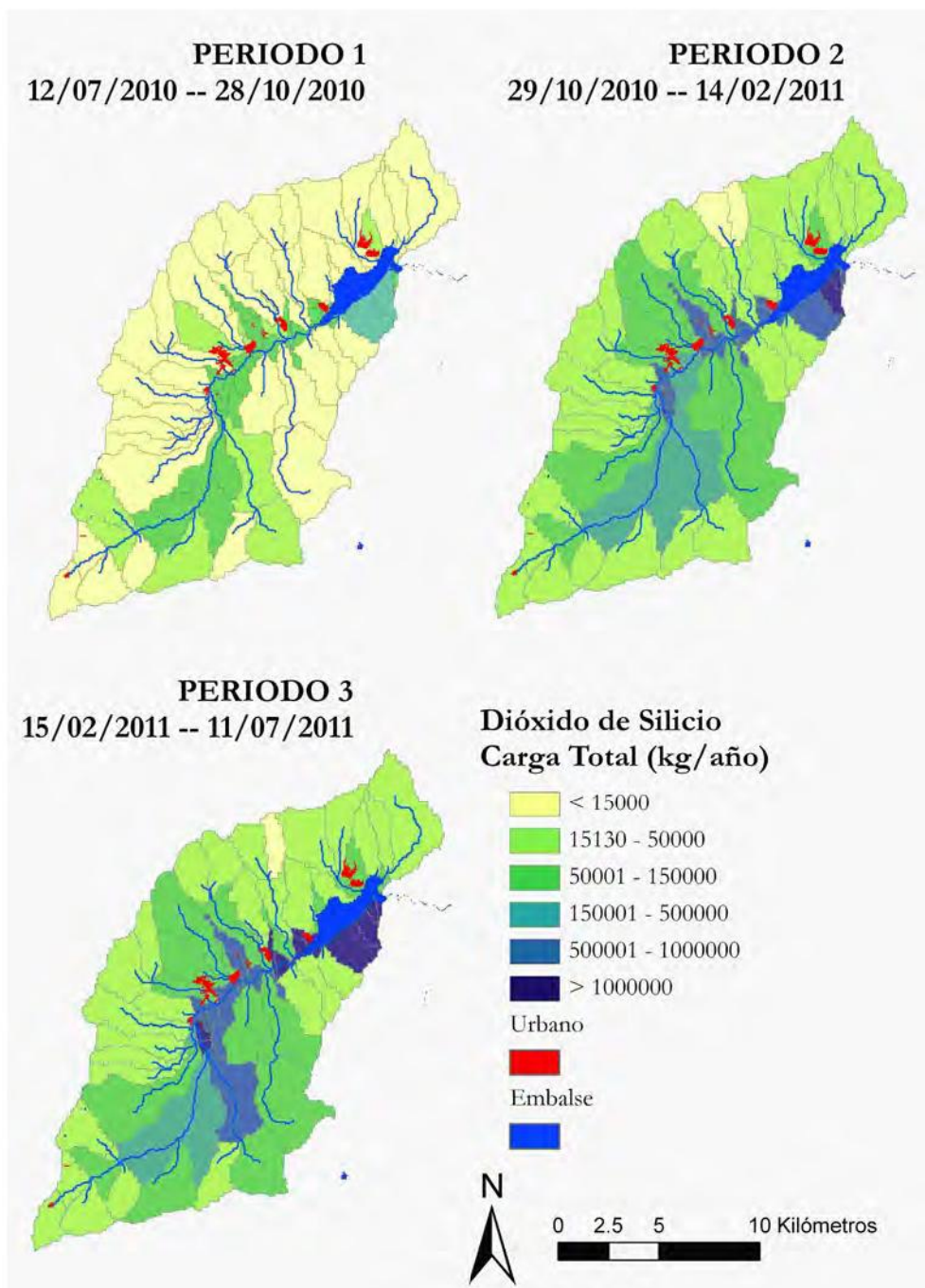


FIGURA 204. CARGA INCREMENTAL DE SÍLICE MODELADA CON SPARROW

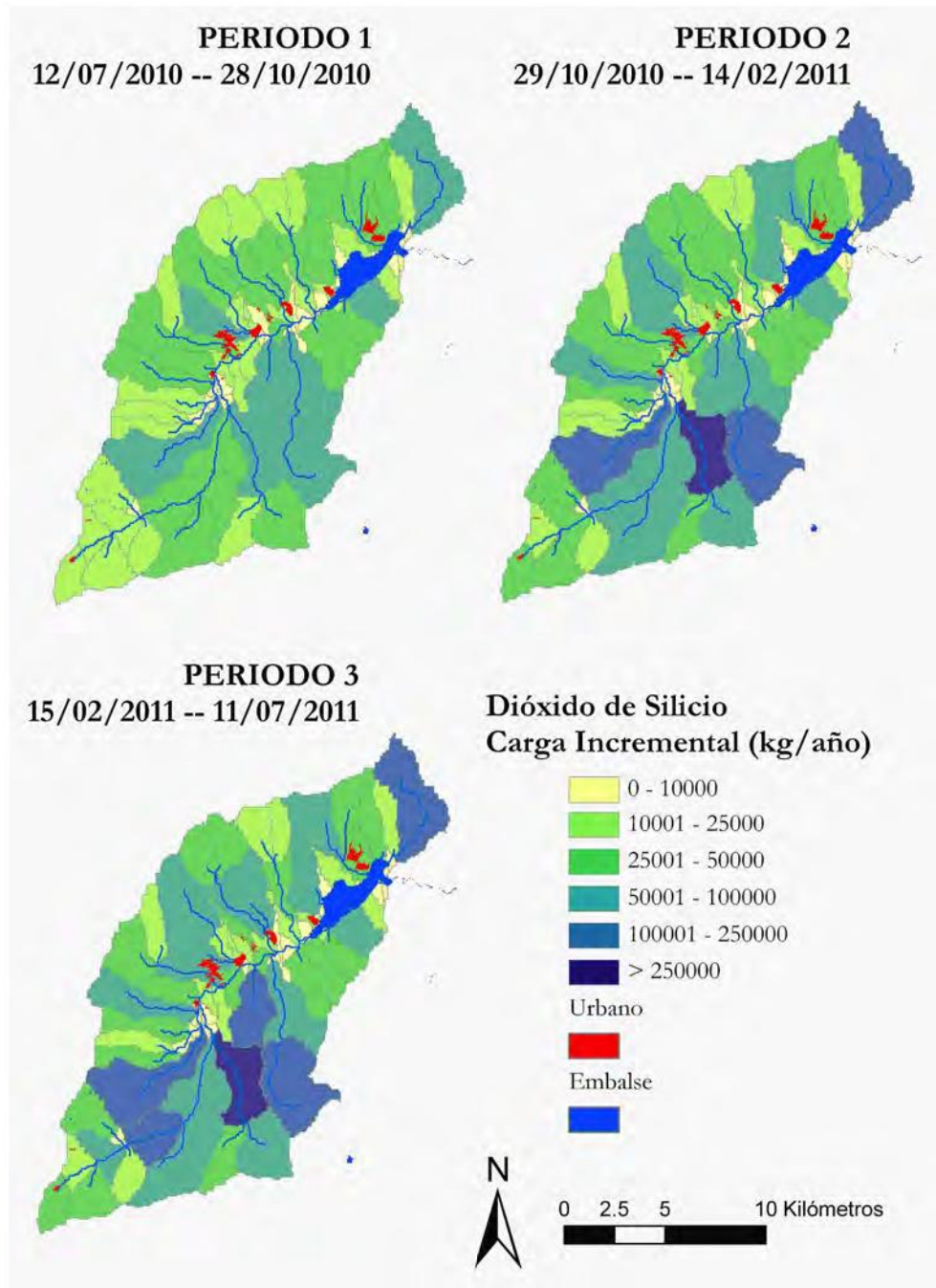


FIGURA 205. CARGA TOTAL DE SÍLICE, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

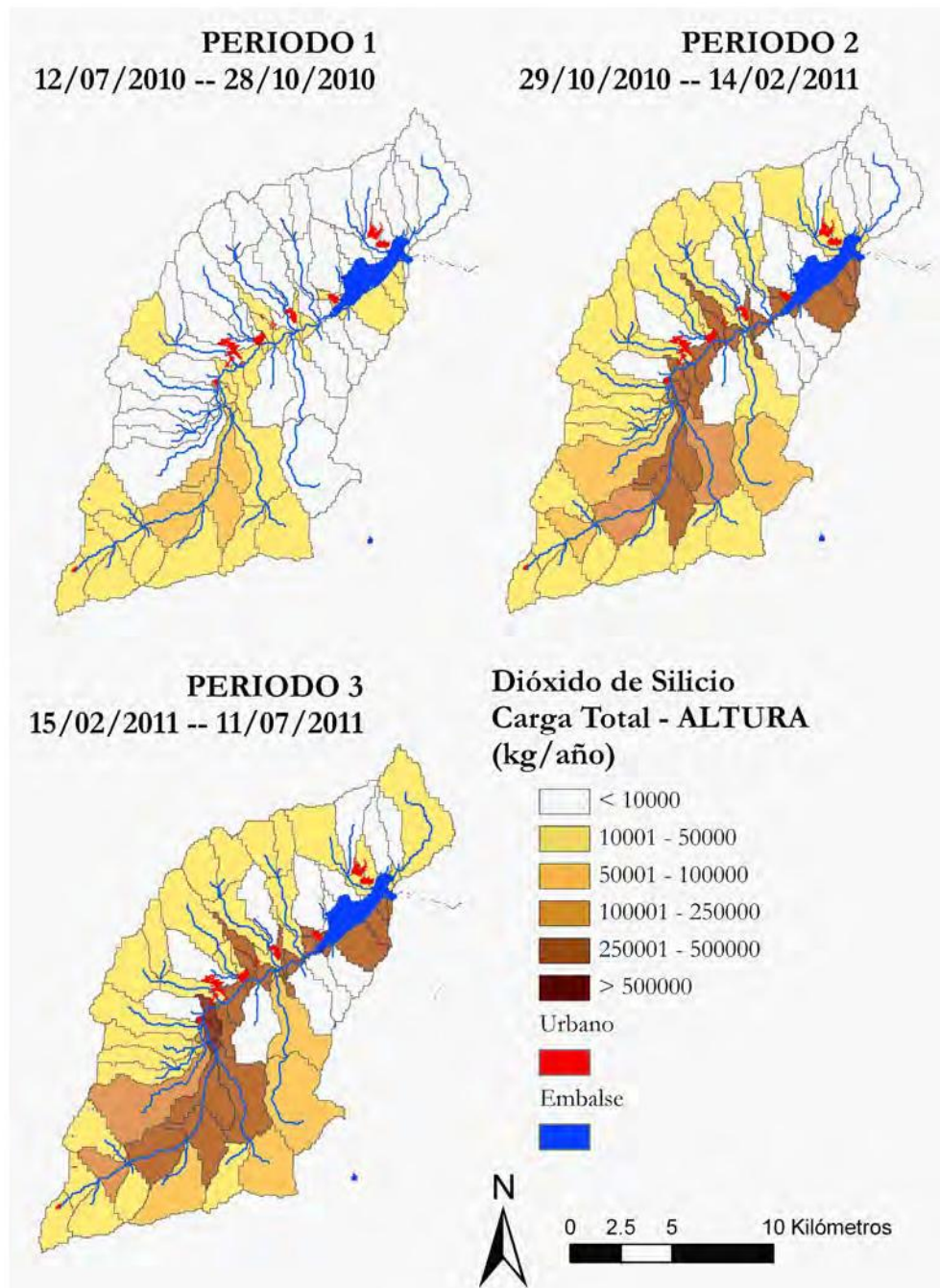


FIGURA 206. CARGA INCREMENTAL DE SÍLICE, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

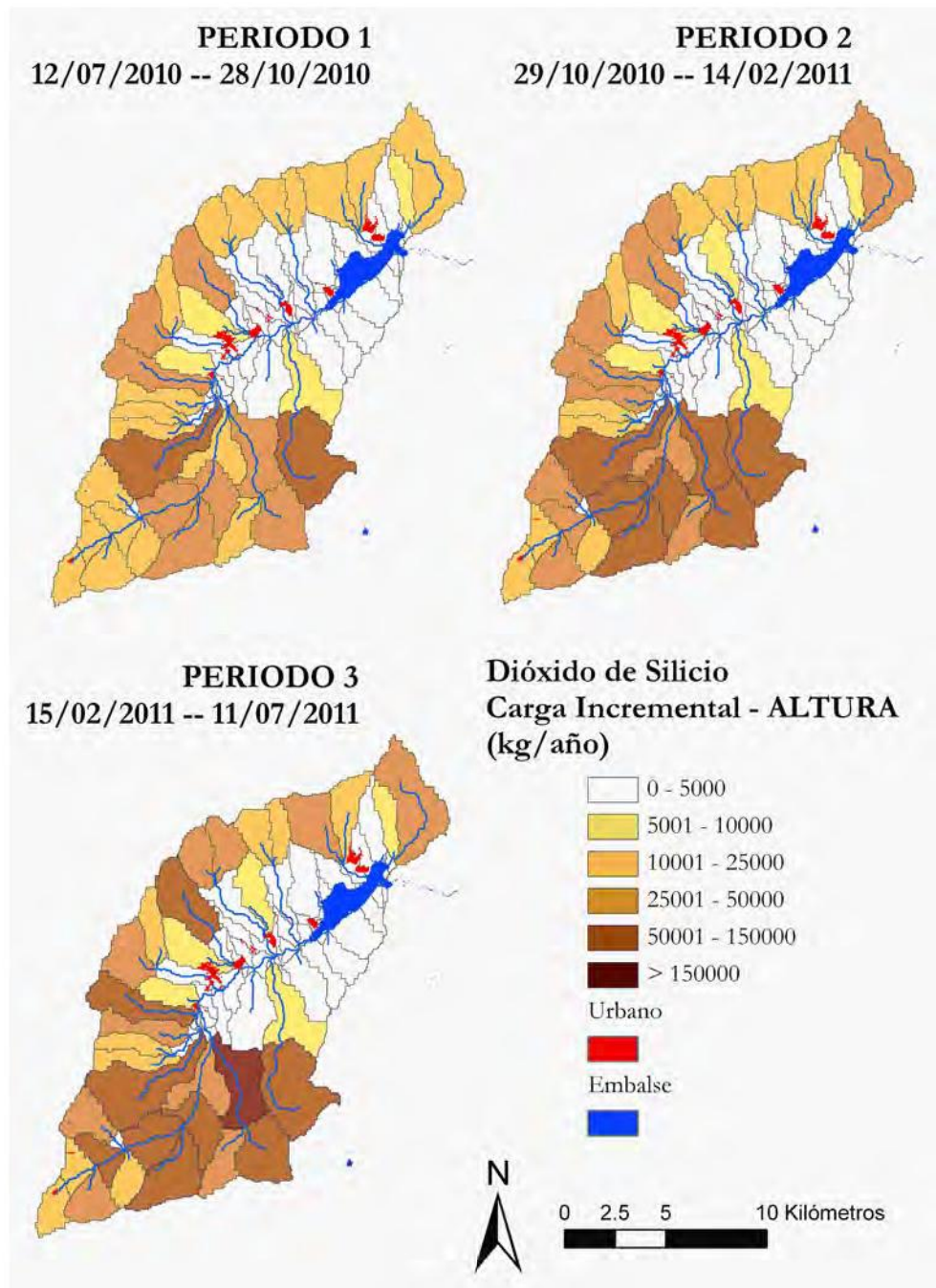


FIGURA 207. CARGA TOTAL DE SÍLICE, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

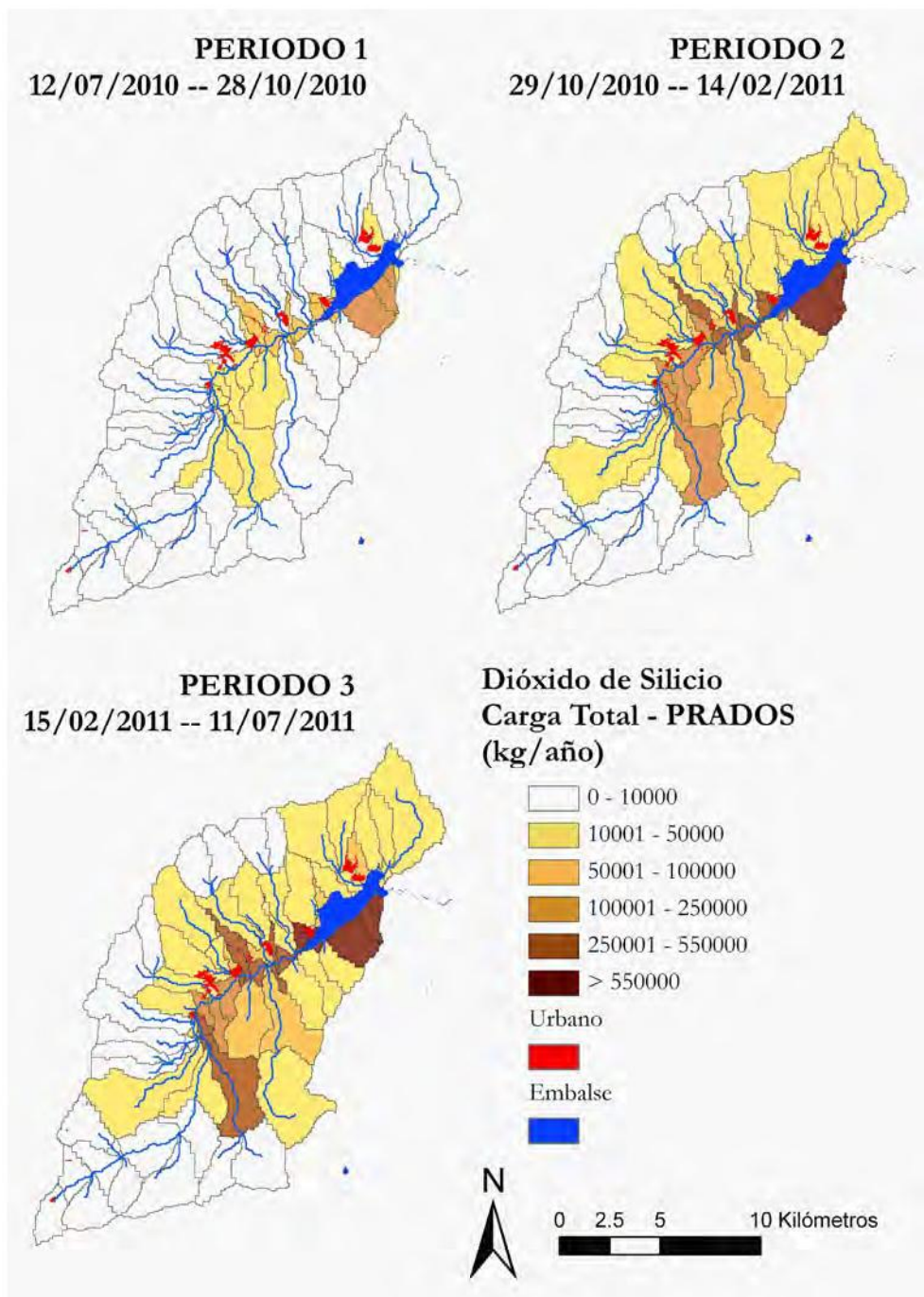


FIGURA 208. CARGA INCREMENTAL DE SÍLICE, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

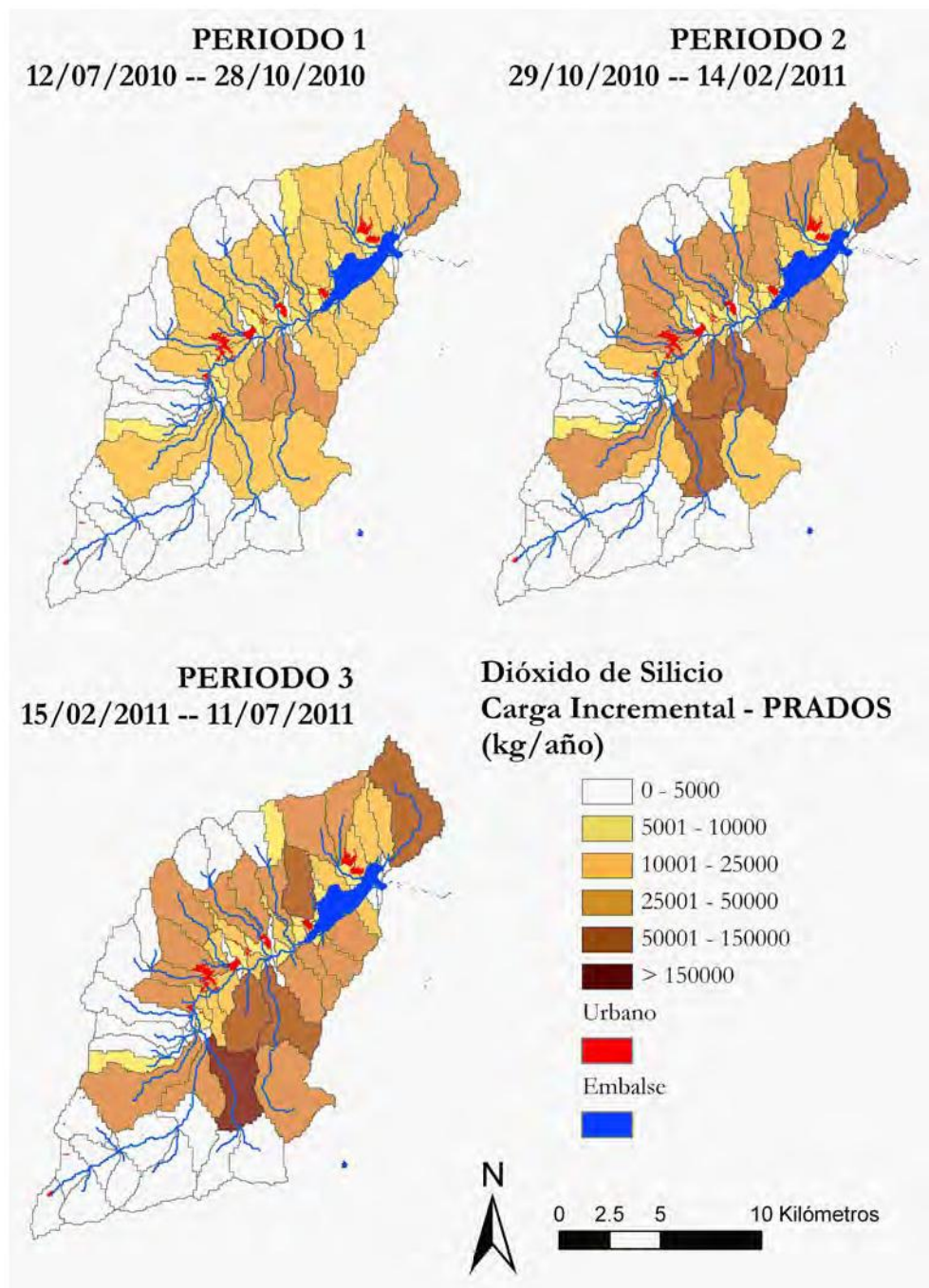


FIGURA 209. CARGA TOTAL DE SÍLICE, ASOCIADA A LA CATEGORÍA *URBANO* DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW

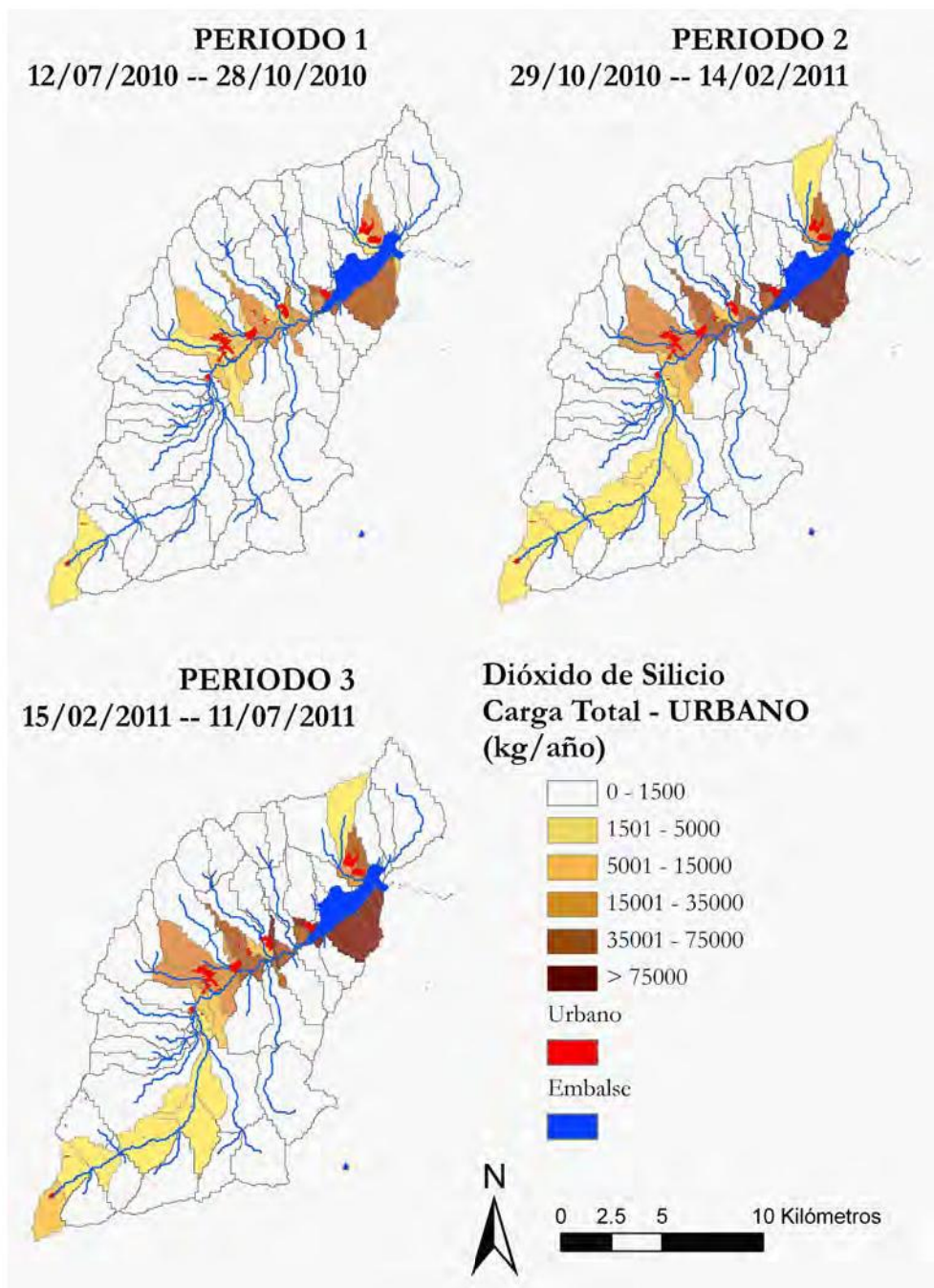
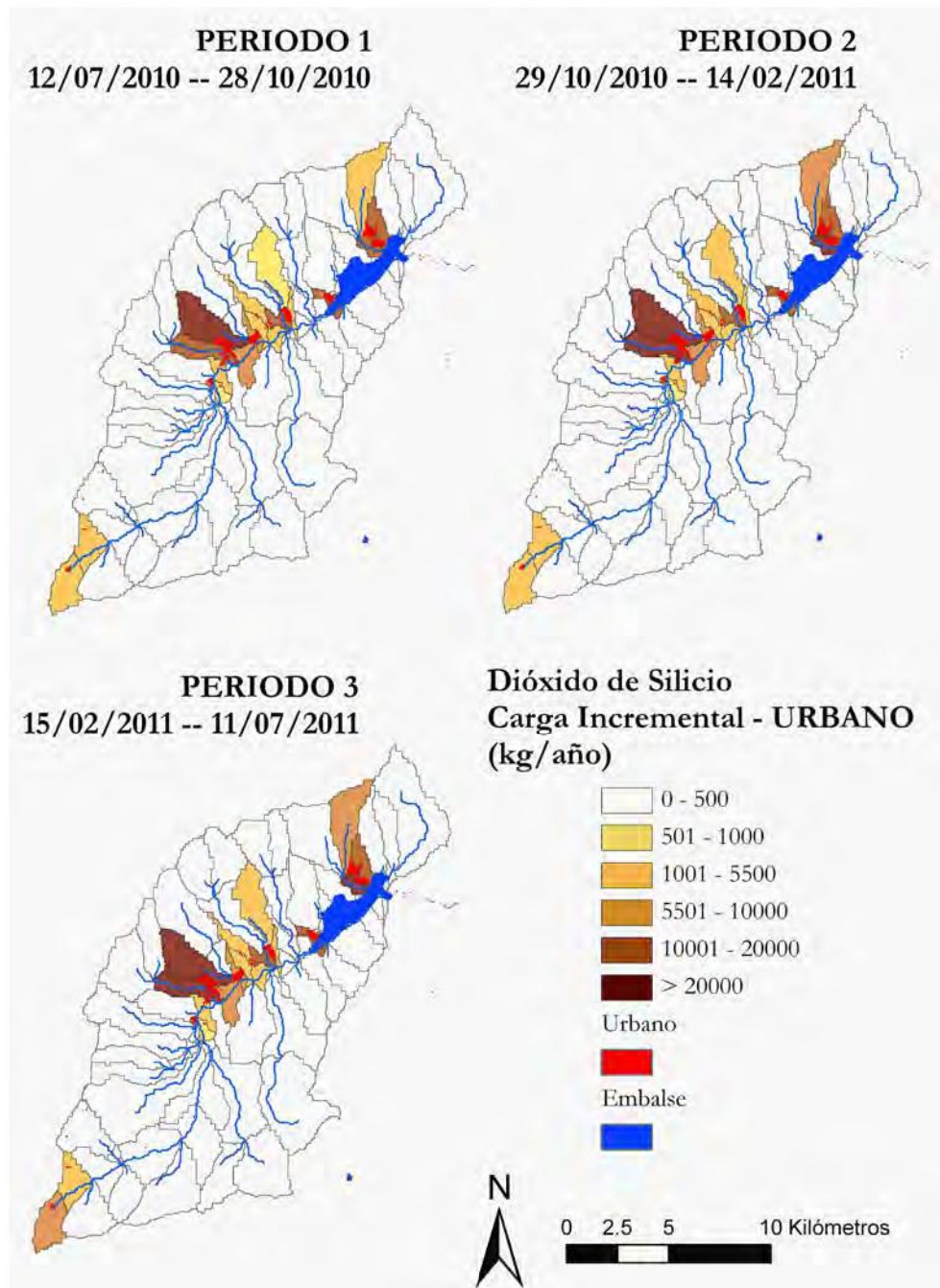


FIGURA 210. CARGA INCREMENTAL DE SÍLICE, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USOS DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW



4.4.11. Resumen de los resultados de los modelos

En general, los resultados obtenidos mediante el modelo SPARROW son coherentes con los balances de cuenca que se recogen en el capítulo 3. Se han identificado las áreas aguas abajo de Valdesquí, el arroyo Umbría, el tramo posterior a Rascafría y Los Grifos y el tramo anterior al punto 11 como los más problemáticos en lo que respecta a los aportes de nutrientes al embalse. Adicionalmente, la modelación ha detectado el arroyo Palomar (en Lozoya) como otro punto destacado a este respecto.

Hay que destacar que los usos **URBANOS** tienen una importancia alta en muchos de los constituyentes modelados, y en muchos casos, no se da un descenso de su importancia con la bajada de caudales en el periodo 1, lo que hace pensar que en muchos casos se trata de aportes puntuales no inventariados. Para **PRADOS** y **ALTURA** el arroyo de Santa Ana puede tomar cierto protagonismo en determinados constituyentes.

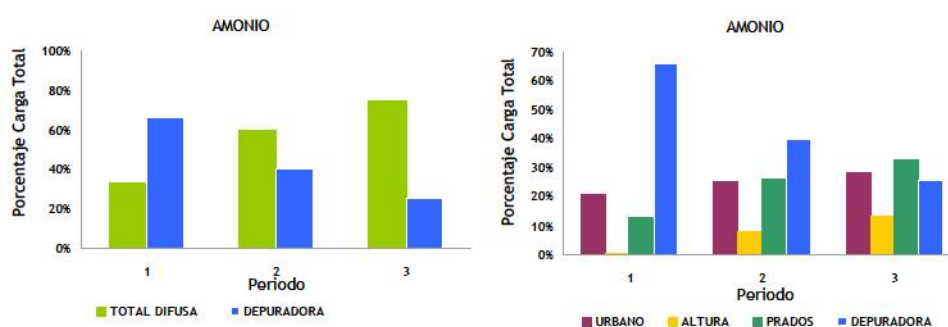
4.5. EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARGAS APORTADAS DESDE LA EDAR

En este último apartado, en lo que a las cargas modeladas con SPARROW se refiere, se muestra una comparativa entre el porcentaje de cargas aportadas por la EDAR y el resto de entradas que llegan al embalse de Pinilla. Esta comparativa se presenta para cada uno de los tres periodos en los que se dividió el cálculo de cargas y la resolución del modelo SPARROW, considerando separadamente cada uno de los tres tipos de uso del suelo con los que trabajó SPARROW (**URBANO**, **PRADOS** y **ALTURA**).

Como se puede observar en las figuras 211 a 220, el porcentaje aportado desde la EDAR juega un papel destacado en el caso del Amonio (Figura 211), el Hierro (Figura 215) y el Fósforo Total (Figura 219). Llegando, en los tres casos, a ser el principal aporte durante el primero de los tres subperiodos del estudio (12/07/10 – 28/10/10). Para el resto de compuestos, las cargas de la EDAR juegan un papel discreto.

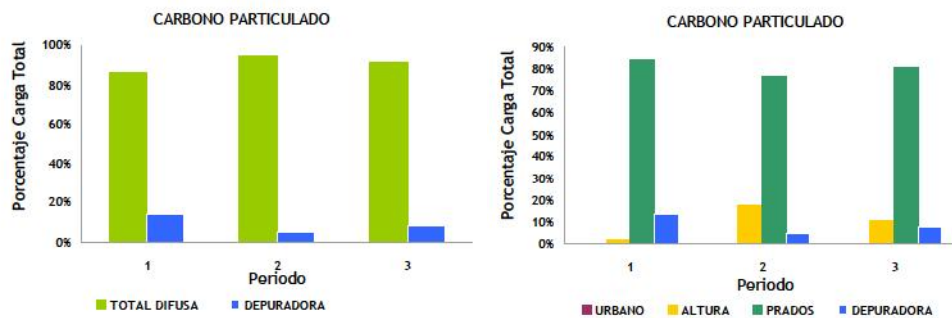
En algunos de ellos, como el Carbono Particulado (Figura 212), el Carbono Orgánico Disuelto (Figura 213), el Nitrógeno Total (Figura 218), y el Sílice (Figura 219), es la categoría **PRADOS**, la que domina el porcentaje de entradas. En las cargas de la Demanda Química de Oxígeno (Figura 214) es también muy importante el porcentaje de cargas asociadas a **ALTURA** durante los periodos 2 y 3, lo que parece sugerir que los usos ganaderos pueden tener un impacto en la exportación de materia orgánica lábil desde los terrenos de altura. Esto se repite para el Nitrato (Figura 217), Carbono Orgánico Disuelto, Manganeseo (Figura 216), Fósforo Total y Sílice. Por su parte, el porcentaje de entradas asociados a la categoría **URBANO**, tiene especial relevancia para el Manganeseo, y son significativas en el caso del Amonio, Nitrógeno Total y Fósforo Total.

FIGURA 211. COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE AMONIO APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA, DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS



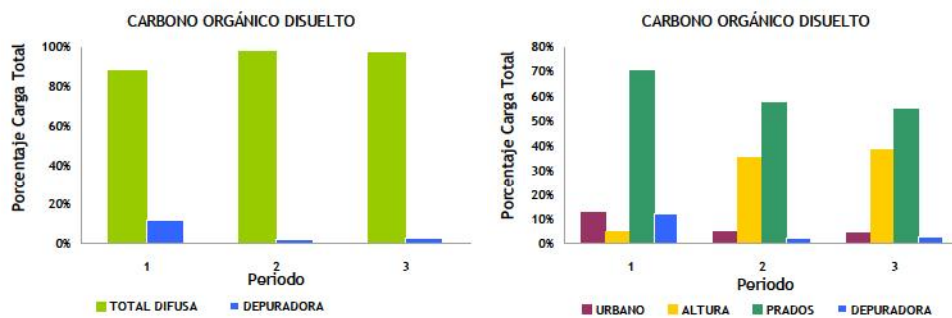
En la figura de la derecha se presentan divididas según la categoría de uso del suelo a la que están asociadas

FIGURA 212. COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE CARBONO PARTICULADO APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA, DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS



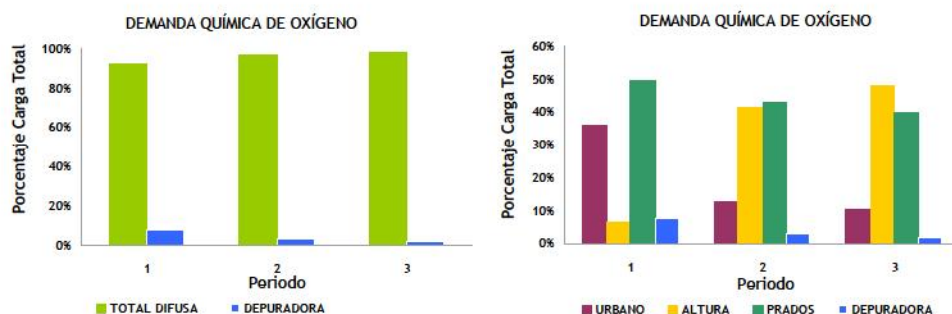
En la figura de la derecha se presentan divididas según la categoría de uso del suelo a la que están asociadas

FIGURA 213. COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE CARGAS DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA, DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS



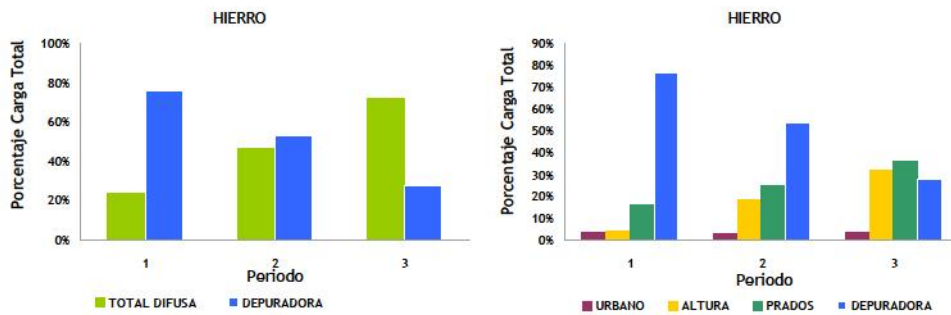
En la figura de la derecha se presentan divididas según la categoría de uso del suelo a la que están asociadas

FIGURA 214. COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA, DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS



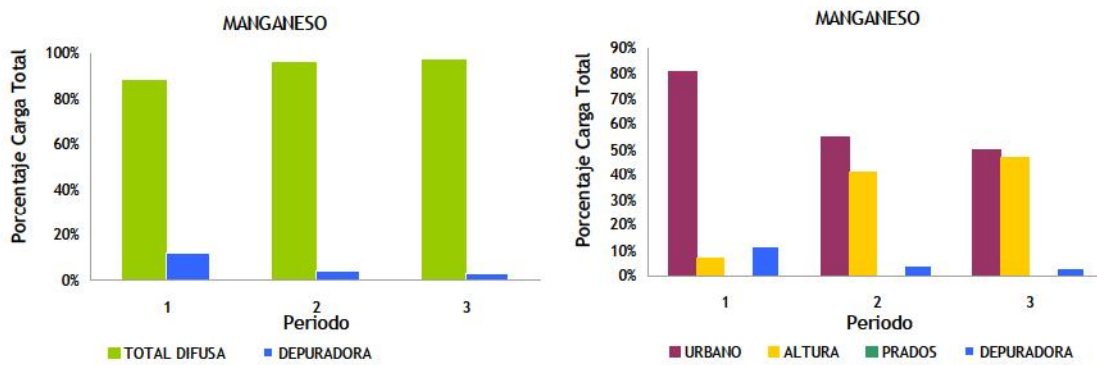
En la figura de la derecha se presentan divididas según la categoría de uso del suelo a la que están asociadas

FIGURA 215. COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE HIERRO APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA, DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS



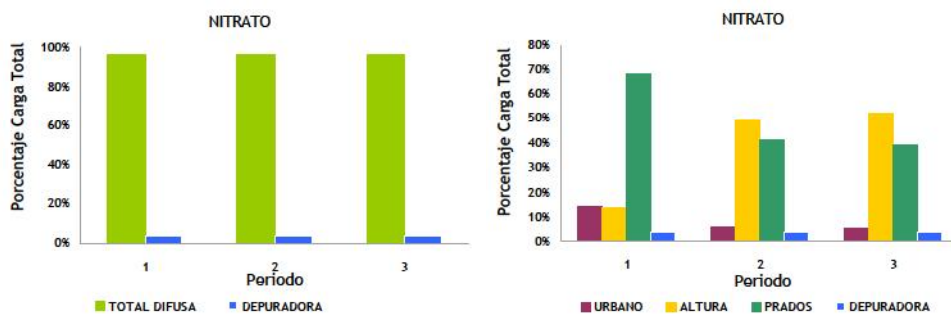
En la figura de la derecha se presentan divididas según la categoría de uso del suelo a la que están asociadas

FIGURA 216. COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE MANGANESO APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA, DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS



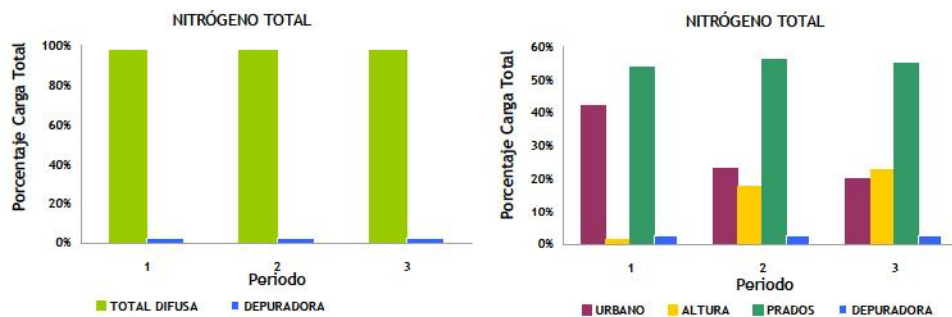
En la figura de la derecha se presentan divididas según la categoría de uso del suelo a la que están asociadas

FIGURA 217. COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE NITRATO APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA, DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS



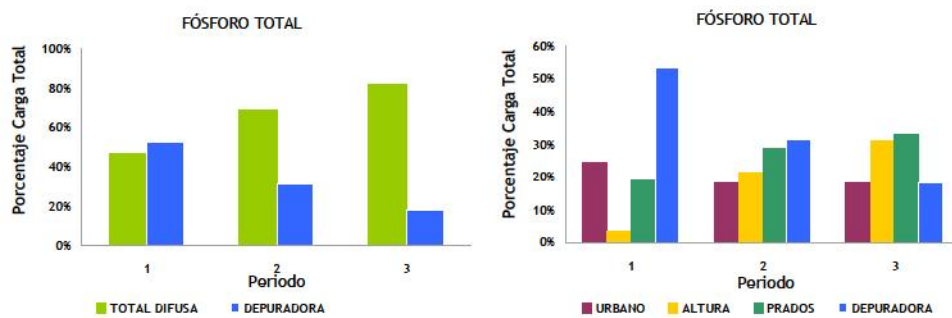
En la figura de la derecha se presentan divididas según la categoría de uso del suelo a la que están asociadas

FIGURA 218. COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE NITRÓGENO TOTAL APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA, DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS



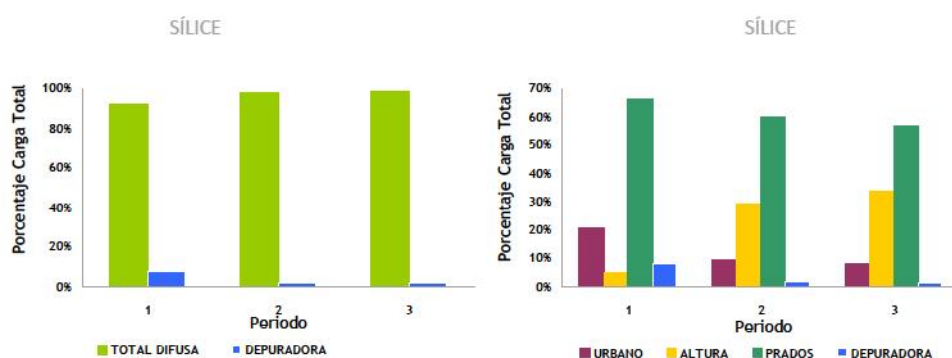
En la figura de la derecha se presentan divididas según la categoría de uso del suelo a la que están asociadas

FIGURA 219. COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE FÓSFORO TOTAL APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA, DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS



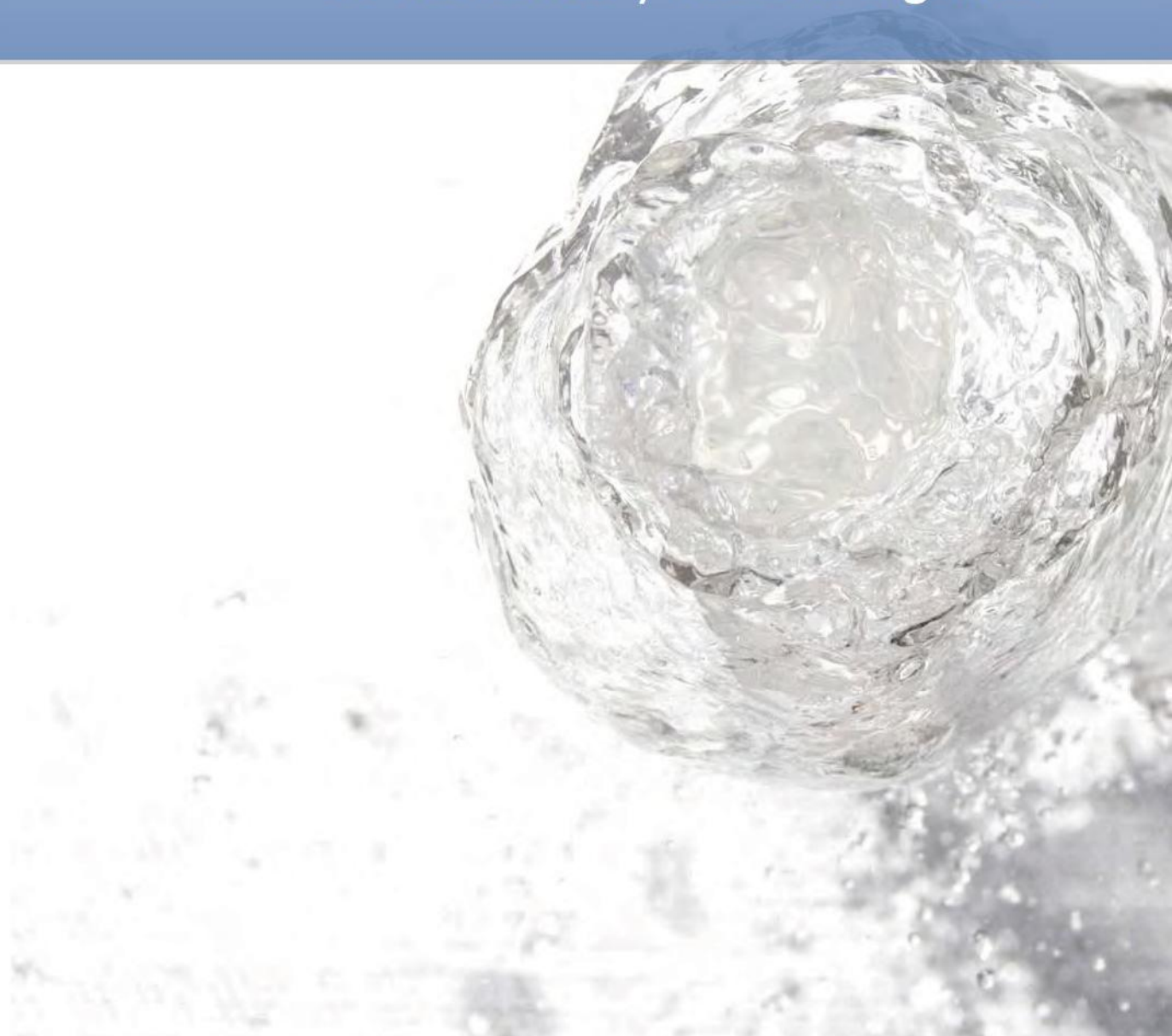
En la figura de la derecha se presentan divididas según la categoría de uso del suelo a la que están asociadas

FIGURA 220. COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE SÍLICE (SiO₂) APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA, DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS



En la figura de la derecha se presentan divididas según la categoría de uso del suelo a la que están asociadas

5. Respuesta del embalse a las cargas de nutrientes y materia orgánica



Para poder proponer medidas eficientes, a escala de cuenca, para el control y mitigación del proceso de eutrofización del embalse de Pinilla, aparte de la identificación de los principales aportes difusos y puntuales de nutrientes y materia orgánica al embalse, es necesario predecir cuál será la respuesta del mismo a las posibles variaciones en la carga de nutrientes y materia orgánica. De esta forma, se pueden elaborar propuestas alternativas con diferentes grados de actuación en la cuenca, cada una con su análisis de beneficios.

En esta sección presentamos diversos modelos empíricos para la predicción de la concentración de clorofila y el desarrollo de capas anóxicas en el embalse, así como para entender la sucesión de las poblaciones algales. El objetivo último es generar una serie de herramientas para la evaluación de los escenarios de gestión que se presentan más adelante, con el fin de tener una aproximación a la respuesta del embalse ante las citadas medidas. Esto también permite aprovechar a fondo la información generada durante el proyecto, ya que combina todos los datos de campo y herramientas desarrolladas en el mismo.

5.1. APLICACIÓN A PINILLA DE MODELOS EMPÍRICOS DE CARGA-RESPUESTA PARA LA PREDICCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA EN EL EMBALSE

5.1.1. Consideraciones previas

Uno de los principales problemas asociados con la eutrofización de embalses es la presencia de grandes cantidades de materia orgánica (algas) en las capas superficiales. Afortunadamente, existen una gran variedad de modelos empíricos que predicen la cantidad de biomasa algal presente en un embalse, según las entradas de nutrientes, en especial el fósforo. En este estudio se han aplicado los modelos empíricos desarrollados por el CEDEX (Ortiz et al, 1983) para la predicción de clorofila en el embalse de Pinilla, y también, se han desarrollado aproximaciones *ad hoc* para su aplicación en este estudio.

La evaluación de la probabilidad de eutrofización de un cuerpo de agua se efectúa normalmente considerando los trabajos clásicos de los modelos carga-respuesta, primeramente, desarrollados por Vollenweider y después, refinados incorporando diversos detalles hidrodinámicos, morfológicos o de la dinámica interna del sistema.

Sin embargo, la mayor parte de estos modelos (por no decir todos) se basan en ecuaciones empíricas construidas sobre la información recogida en sistemas lacustres, normalmente de latitudes templadas húmedas. Esto hace que estas ecuaciones no suelen ser muy precisas cuando se aplican a embalses, debido a las peculiaridades que presentan estos sistemas y que los diferencian, en gran medida, de los lagos naturales.

Si además, los embalses están situados en la Península Ibérica, la posibilidad de que las ecuaciones tengan una pobre capacidad predictiva aumenta debido a los contrastes entre el clima peninsular, y el de las regiones para las que fueron desarrolladas las ecuaciones.

Por tanto, a pesar de que existen decenas de modelos carga-respuesta, la práctica totalidad de las aproximaciones empíricas desarrolladas no deberían ser aplicadas a embalses, a no ser que su bondad pueda ser testada con datos históricos antes de aplicarse en escenarios de tipo predictivo. No es posible aplicar un análisis extensivo de este tipo aquí, ya que no es posible testar la bondad de ningún cálculo sin una serie de datos reales sobre el comportamiento del cuerpo de agua y las entradas de materiales desde el río de, al menos, una década.

Por tanto, la única alternativa válida en nuestro caso es aplicar alguna aproximación empírica específicamente desarrollada para embalses peninsulares. Afortunadamente, esta metodología existe y además fue desarrollada por investigadores de la Península Ibérica, utilizando datos de un número considerable de embalses españoles. Se trata del estudio de Ortiz et al. (1983) "Aportación de nutrientes y eutrofización de embalses", publicado por el CEDEX, donde se reevalúan los modelos carga-respuesta de la OCDE, pero considerando únicamente los datos provenientes de un conjunto de 17 embalses españoles de diversa morfología, grado trófico y sustrato geológico. Se trata pues, de la metodología de referencia a la hora de aplicar modelos carga-respuesta en embalses peninsulares.

El método empírico desarrollado por estos autores es una revisión de los modelos de la OCDE desarrollados por Vollenweider, y consiste en diversas ecuaciones empíricas para evaluar diferentes variables relacionadas con el grado de eutrofia del sistema. En nuestro caso, nos interesa la ecuación para la **concentración de clorofila** en el embalse, determinada a partir de la **carga de fósforo** desde los tributarios.

Como es de esperar, muchas de estas relaciones empíricas incluyen variables relacionadas con la morfología del sistema y la tasa de renovación del agua. Las ecuaciones correspondientes y la bondad de su ajuste se presentarán junto con los resultados para el embalse de Pinilla. Son necesarias diversas consideraciones a la hora de interpretar los resultados obtenidos utilizando esta metodología:

- Estos modelos asumen que la carga principal de nutrientes, y por tanto el forzamiento del sistema, tiene origen externo. Es decir, que no hay fuentes internas de nutrientes significativas (cargas internas de fósforo desde el sedimento, etc.). Ahora bien, en nuestro caso se considerarán las entradas, no sólo desde los tributarios, sino también de la depuradora de Pinilla.
- No se consideran aportes externos significativos en cuanto a materia orgánica. Esto los hace inhábiles para los cálculos del consumo de oxígeno en embalses, ya que en éstos el consumo de oxígeno está muy frecuentemente determinado por cargas externas de materia orgánica. De hecho, en el trabajo publicado por el CEDEX la tasa de consumo de oxígeno no mostró ninguna relación con la carga de nutrientes. También los hace poco útiles en caso de que especies mixotróficas dominen la biomasa de la comunidad fitoplanctónica (por ejemplo criptofíceas). Es la situación de Pinilla, al menos durante el periodo de estudio.
- Los modelos empíricos desarrollados por Ortiz et al. (1983) nos dan la probabilidad de que un cuerpo de agua presente problemas de eutrofización, pero de forma muy genérica y siempre a escalas anuales. Efectos sobre la calidad del agua derivados de procesos relacionados con la morfología del sistema y su hidrodinámica no pueden ser previstos por los modelos empíricos, y deben ser analizados con otro tipo de modelos.

5.1.2. Aplicación y resultados de los modelos de carga-respuesta clásicos

La primera aproximación utilizada ha sido la ecuación para la concentración de clorofila promedio anual (Chl) de Ortiz et al. (1983):

$$Chl = 1.43 \times \left(\frac{P_i}{1 + \sqrt{T_w}} \right)^{0.4}$$

Donde P_i es la concentración promedio anual de fósforo total ponderada en todos los aportes al embalse (la ponderación se efectúa respecto al caudal entrado en todo el periodo), y T_w es el tiempo de residencia medio del agua en el embalse, calculado utilizando las entradas al embalse y el volumen promedio. En nuestro caso, para el cálculo de P_i se han utilizado las concentraciones de fósforo total en los puntos de muestreo 11, 12, 13 y 14, además del efluente de la depuradora de Pinilla. La concentración promedio anual de clorofila, que se ha utilizado como referencia para la bondad de las ecuaciones, corresponde al promedio anual ponderado por el volumen en todo el embalse. Los resultados utilizando otros criterios, como ceñir el cálculo a capas de mezcla, dieron resultados prácticamente idénticos.

Los valores de P_i y T_w para el embalse de Pinilla durante el periodo de estudio son los siguientes:

$$P_i = 44,34 \text{ mg m}^{-3}$$

$$T_w = 0,22 \text{ años}$$

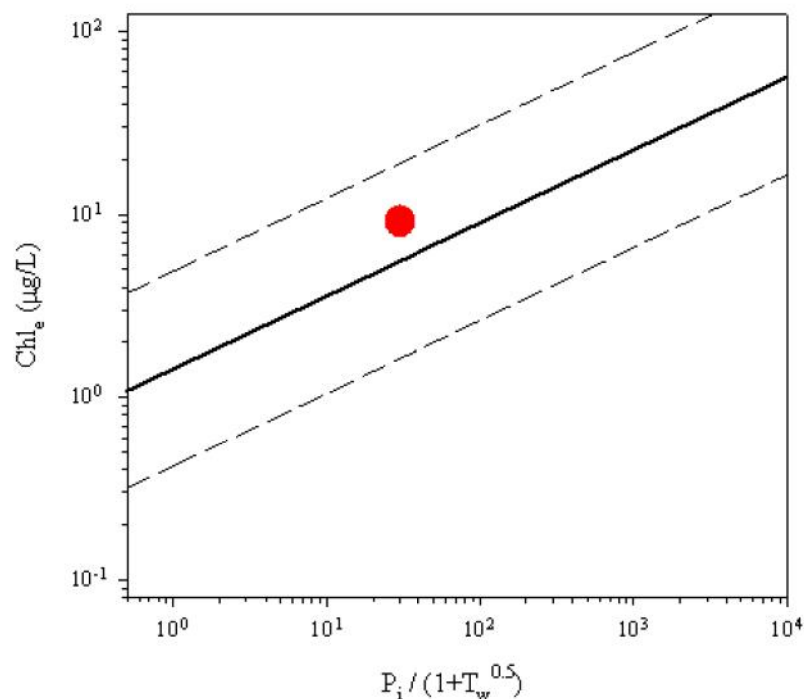
Por tanto, aplicando la ecuación presentada anteriormente la concentración de clorofila media esperada en el embalse resulta en:

$$\text{Predicción Chl} = 5,58 \text{ mg m}^{-3}$$

Lo cual es una aproximación razonable al valor de Chl observada, $9,26 \text{ mg m}^{-3}$.

Estos resultados pueden presentarse de forma gráfica mostrando la ecuación predictiva en el eje Chl versus la concentración de fósforo en el embalse en estado estacionario, si este actuara como un reactor totalmente mezclado (Figura 221).

FIGURA 221. FUNCIÓN QUE RELACIONA LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN LOS TRIBUTARIOS (P_i) CON LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA ESPERADA ($\mu\text{g/L}$) SEGÚN LAS ECUACIONES DEL CEDEX



El punto rojo se corresponde con la situación observada en Pinilla durante el año de muestreo

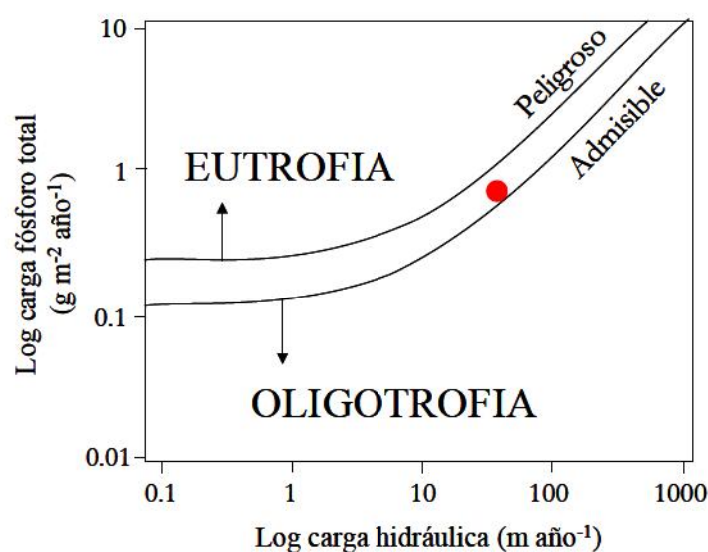
Se aprecia que los resultados de aplicar los modelos del CEDEX son muy razonables, aunque su capacidad predictiva se ve mermada por la amplia incertidumbre que lleva asociada la utilización de estos modelos empíricos. A escala anual, Pinilla se comporta de un modo bastante predecible desde el punto de vista de los modelos carga-respuesta, aunque sólo con datos de un año es difícil saber si la carga de fósforo realmente define la variabilidad interanual de clorofila en el embalse.

Desde el punto de vista del estado trófico, los valores de carga hidráulica y de carga de fósforo definen Pinilla como un embalse al borde de la eutrofización (Figura 222). Esto podría parecer un contrasentido con la experiencia de los técnicos de Canal de Isabel II, que han descrito frecuentemente problemas por blooms algales y capas anóxicas en el embalse, lo que sugeriría un avanzado estado de eutrofización. Estas aparentes contradicciones pueden explicarse teniendo en cuenta:

- Por un lado, el hecho de que se produzcan puntualmente *blooms algales* no invalida la caracterización a escala anual. A esta escala, el embalse de Pinilla puede considerarse eutrófico por las concentraciones de clorofila que presenta, pero de forma moderada, en ningún caso, aguda.
- Por otra parte, que las concentraciones de clorofila medidas en el embalse son ligeramente superiores a las esperadas por los modelos de carga-respuesta. Esto podría deberse a la proliferación de algas mixotróficas, que pueden responder tanto al nivel de nutrientes como al de materia orgánica. Esta última variable no está incluida en ningún modelo de carga-respuesta para la clorofila. Como se verá más adelante, Pinilla presenta importantes proliferaciones de criptófitas, un alga mixotrófica.
- Finalmente, como también se verá más adelante, la generación de capas anóxicas en los embalses no debe relacionarse con la carga de nutrientes y los niveles de biomasa algal, sino con la carga de materia orgánica alóctona.

En todo caso, los modelos de carga-respuesta sitúan al embalse de Pinilla en una situación delicada, ya que un aumento de la carga de nutrientes unido a una disminución de los caudales podría resultar en un empeoramiento brusco del estado trófico del embalse.

FIGURA 222. DIAGRAMA DE VOLLENWEIDER CON LA POSICIÓN DEL EMBALSE DE PINILLA



5.1.3. Aplicación y resultados de los modelos elaborados *ad hoc*

Los modelos de carga-respuesta presentados hasta ahora son herramientas muy útiles para una evaluación general del estado del sistema, y de su posible evolución frente a cambios en la carga de nutrientes o de la cantidad de agua que entra al sistema. Sin embargo, estos modelos están basados en generalizaciones que utilizan datos de decenas o centenas de embalses, en ellos, la idiosincrasia de cada cuerpo de agua queda totalmente desdibujada.

Para paliar esta deficiencia, hemos desarrollado un modelo empírico utilizando los datos recogidos en este estudio. Obviamente, el modelo no puede trabajar a la escala anual, ya que consideraría sólo un punto, así que ha de intentarse explicar las variaciones observadas en todos los muestreos del embalse durante el periodo de estudio (en total 20 visitas), pero sin aplicar un modelo dinámico para ese propósito, lo que queda fuera del alcance de este proyecto. Alternativamente, se ha decidido trabajar de dos formas:

- Primero, agrupando los datos en los tres periodos utilizados para la caracterización de las cargas al embalse y los modelos presentados en apartados anteriores (del 12/07/2010 al 28/10/2010; del 29/10/2010 al 14/02/2011; y del 15/02/2011 al 11/07/2011).
- Segundo, utilizando redes neuronales para intentar trabajar con todos los datos disponibles, tratando de confirmar las relaciones apuntadas en la aproximación anterior. Con la escasez de datos disponibles, estos modelos no han de considerarse más que como una primera aproximación a la dinámica de la clorofila en el embalse.

Aunque la capacidad predictiva de estos modelos no se pueda considerar robusta (debido a la mencionada insuficiencia de los datos utilizados para su construcción), estos modelos sí se muestran útiles para establecer primeras hipótesis sobre las principales variables que fuerzan la concentración de clorofila a escala estacional y los posibles impactos de determinadas medidas de mitigación.

5.1.3.1. Modelo considerando tres periodos

Como primer paso, se ha aplicado la aproximación de Ortiz a los tres periodos definidos en anteriores apartados del estudio (Figura 15), ajustando las ecuaciones al caso particular de Pinilla. Para ello se han utilizado las variables clásicas de este tipo de modelos:

- la concentración, ponderada por el volumen de la clorofila en el embalse,
- la hidrología, expresada como tiempo de residencia del agua (promedio de cálculo utilizando las entradas y las salidas),
- y la concentración de nitrógeno y fósforo total en las entradas al embalse.

Adicionalmente, se ha utilizado también la DQO. Estas concentraciones han de ser ponderadas por el volumen relativo de los diferentes aportes, en nuestro caso incluyendo la depuradora de Pinilla.

Se ha utilizado la ecuación básica de Ortiz (basada en los trabajos de Wollenweider):

$$Chl = a \times \left(\frac{P_i}{1 + \sqrt{T_w}} \right)^b$$

Siendo a y b parámetros a ajustar, P_i la concentración ponderada del constituyente (nitrógeno o fósforo total o DQO), y T_w el tiempo de residencia del agua. Los valores de a y b se han ajustado para minimizar el error cuadrático medio entre los valores de clorofila observados y obtenidos con las tres ecuaciones considerando cada vez un constituyente diferente. Obviamente, al disponer sólo de tres puntos para calibrar el modelo, los resultados se han de interpretar con mucha cautela y sólo con el ánimo de describir qué variables pueden ser las más importantes en la evolución de la clorofila en el embalse. Se ha de evitar cualquier ambición predictiva con los modelos ajustados en este apartado.

Los resultados para los tres modelos son:

FIGURA 223. RESULTADOS DEL MODELO PARA EL FÓSFORO TOTAL

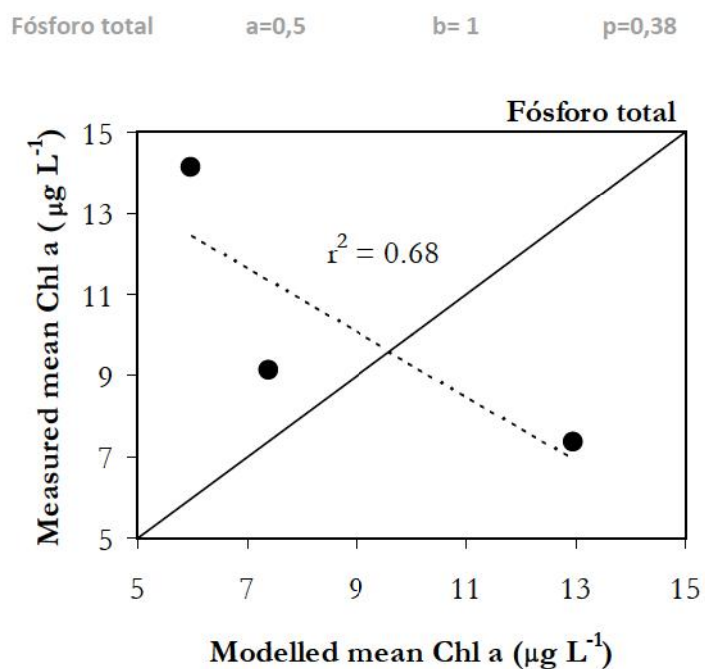


FIGURA 224. RESULTADOS DEL MODELO PARA EL NITRÓGENO TOTAL

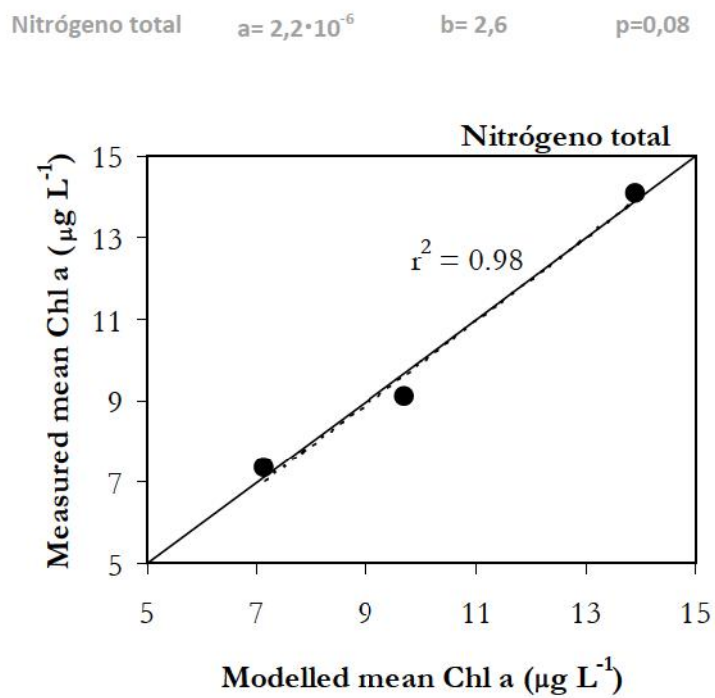
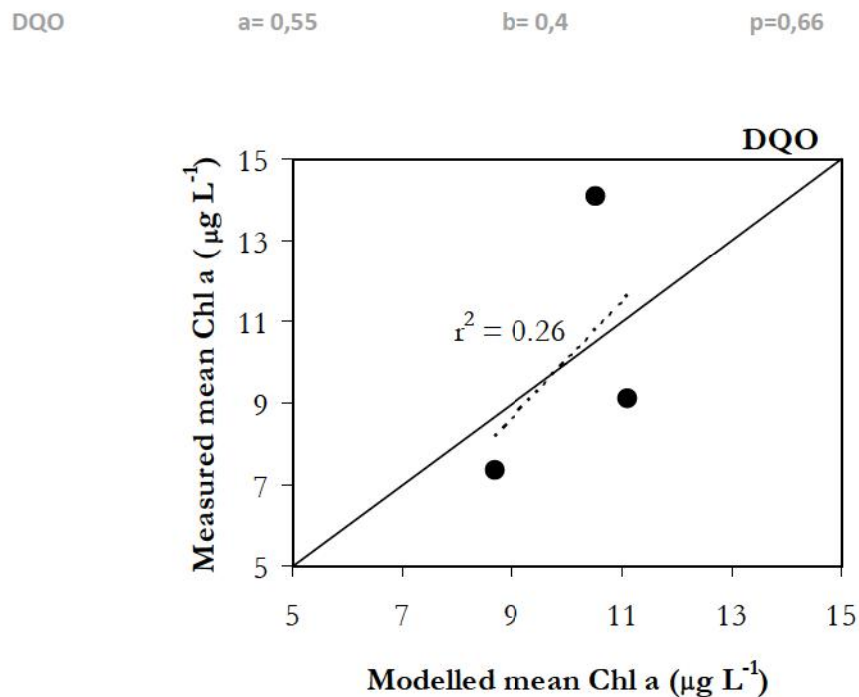


FIGURA 225. RESULTADOS DEL MODELO PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO



Aun considerando todas las precauciones antes señaladas para la interpretación de los resultados, éstos parecen apuntar a que la variabilidad intraanual de la concentración de clorofila en el embalse está controlada fundamentalmente por los aportes de nitrógeno o alguna otra variable colineal, al menos durante el año de estudio.

Curiosamente, la dinámica del fósforo total en los tributarios sigue una dinámica opuesta a la esperada si estos jugaran un papel fundamental en el control de la clorofila, e incluso la DQO parece ser una variable más relacionada con ella. Estas relaciones con el nitrógeno total y la DQO (aunque mucho más débil) parecen apuntar a que la concentración de clorofila está controlada básicamente por aportaciones de materiales que incrementan su concentración con el caudal. El nitrógeno podría ser realmente la variable fundamental, aunque también podría no ser más que la expresión cuantificada de una serie de materiales que aumentan su concentración con el caudal, quizás materiales orgánicos, lo que apuntaría a un protagonismo de las especies mixotróficas en el embalse. Como se verá más adelante, esto fue así al menos durante el año estudiado.

5.1.3.2. Modelo de red neuronal considerando todos los muestreos

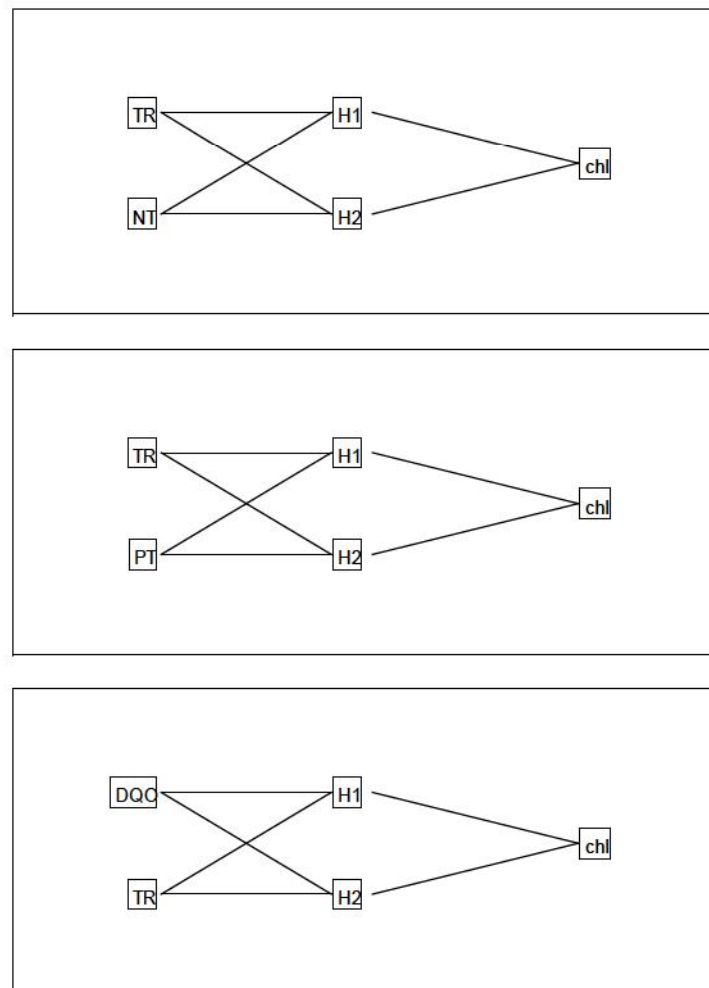
La modelación de la concentración de clorofila a escala quincenal en el embalse propone un desafío importante, ya que sólo se dispone de una dinámica anual, no contando con patrones repetitivos con los que fundamentar el ajuste empírico. Aún así, si se incluye una estimación apropiada de la incertidumbre de un ajuste con estas limitaciones, los resultados pueden llegar a ser muy informativos.

Se han escogido las redes neuronales en este caso ya que suponen un balance interesante entre flexibilidad del modelo (indispensable tratándose de la clorofila en un embalse, con dinámicas muy complejas, a menudo no lineales), número de parámetros incluidos en la modelación e incertidumbre asociada a los resultados.

Para construir las redes neuronales se ha utilizado la variable **clorofila en el embalse** como la respuesta a modelar, con varias combinaciones de dos variables explicativas. La limitación a dos variables la marca la cantidad de datos disponibles. Siguiendo con el razonamiento de los modelos de carga-respuesta, se ha considerado el tiempo de residencia del agua (estimada en periodos quincenales) como una variable siempre presente en los modelos. Esta variable, como en el caso de los modelos presentados en el apartado anterior, se ha combinado bien con la concentración de fósforo total, nitrógeno total o la DQO, lo que da un total de tres redes neuronales diferentes.

Las redes neuronales se han construido en el entorno JMP (SAS Institute), y se han considerado sólo dos nodos ocultos en una sola capa para evitar en lo posible los problemas de ajuste local (overfitting) que serán muy probables en un ejercicio con sólo 20 casos. El riesgo de ajuste local no generalizable se ha intentado minimizar con la división de los datos en un grupo de calibración y otro de verificación, intentando que los dos grupos cubrieran aproximadamente todo el rango de concentración de clorofila observado. El grupo de calibración consta de 13 casos, el de verificación de 7. El proceso de calibración de cada red neuronal se ha llevado a cabo maximizando la variabilidad explicada en el grupo de verificación, pero sin que estos datos sean utilizados por la red para calibrar los nodos ocultos, evitando así ajustes locales y aumentando la generalidad de los modelos. Los diagramas de red neuronal para los tres modelos construidos se pueden consultar en la Figura 226, donde H1 y H2 representan los nodos ocultos de la red.

FIGURA 226. DIAGRAMAS DE LAS REDES NEURONALES APLICADAS EN LOS TRES MODELOS CONSTRUIDOS



Nitrógeno total (superior); Fósforo total (central); y Demanda química de oxígeno (inferior)

Los resultados del ajuste de los modelos muestran que la red que incluye al nitrógeno total es la única con capacidad de generalización y buen ajuste. En los otros dos casos el ajuste es incapaz de predecir las concentraciones observadas en el grupo de verificación, con evidentes síntomas de problemas de ajuste local y falta de generalización.

TABLA 38. VALORES DE r^2 PARA CADA UNO DE LOS TRES MODELOS DE RED NEURONAL, DIFERENCIANDO EL GRUPO DE CALIBRACIÓN Y EL DE VERIFICACIÓN

Modelo	r^2 grupo de calibración	r^2 grupo de verificación
TR + NT	0,94	0,90
TR + PT	0,58	0,31
TR + DQO	0,75	0,00

Se llega a la misma conclusión, atendiendo a los resultados gráficos, en el eje temporal, incluyendo aquí la región de incertidumbre representada por los intervalos al 95%.

No sólo se aprecia que el modelo para el nitrógeno total es el único que predice de forma correcta la evolución de la concentración de clorofila, sino que también el grado de incertidumbre es lo suficientemente bajo como para que este modelo se pueda considerar una herramienta útil para los ejercicios heurísticos, con escenarios de gestión que se presentarán más adelante en el documento.

Estos resultados también reafirman los presentados anteriormente en relación al papel del nitrógeno en el control de la clorofila. Las dos alternativas expresan que efectivamente el nitrógeno está controlando la cantidad de clorofila (al menos las variaciones estacionales que se han observado durante el periodo de estudio, ya se ha visto que el fósforo total podría definir la concentración a escala anual), o bien que el nitrógeno total sea una representación de materiales que entran al embalse con caudales altos.

FIGURA 227. REPRESENTACIÓN DE LA PREDICCIÓN DEL MODELO PARA EL NITRÓGENO TOTAL, INCLUYENDO EL INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95% Y LOS VALORES OBSERVADOS

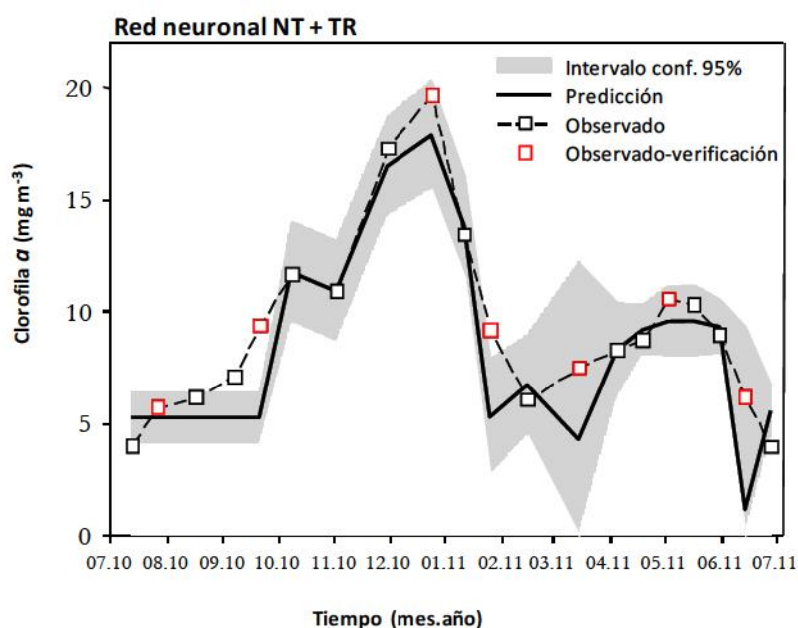


FIGURA 228. REPRESENTACIÓN DE LA PREDICCIÓN DEL MODELO PARA EL FÓSFORO TOTAL, INCLUYENDO EL INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95% Y LOS VALORES OBSERVADOS

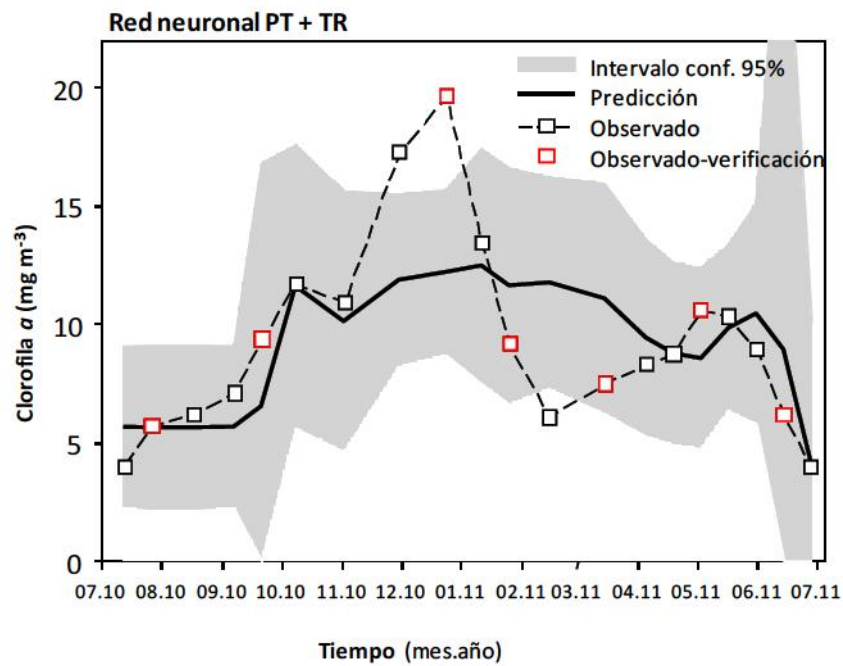
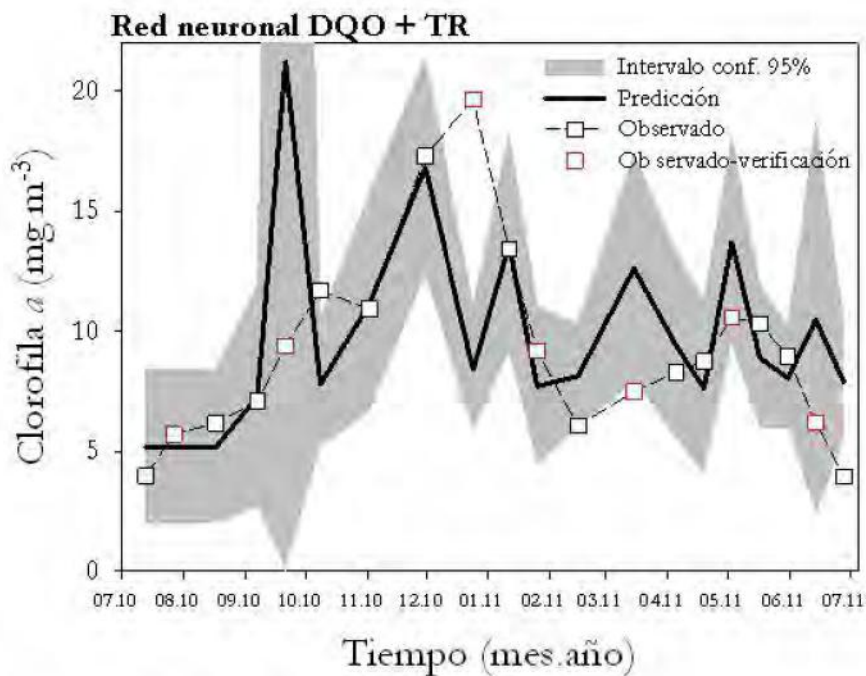


FIGURA 229. REPRESENTACIÓN DE LA PREDICCIÓN DEL MODELO PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, INCLUYENDO EL INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95% Y LOS VALORES OBSERVADOS



5.2. ANÁLISIS DEL PAPEL DE LA MATERIA ORGÁNICA, PROVENIENTE DE LA CUENCA EN LA GENERACIÓN DE CAPAS ANÓXICAS, EN EL FONDO DEL EMBALSE PINILLA

La generación de capas anóxicas en el fondo de los embalses (entendiendo por anoxia situaciones en las que la concentración de oxígeno disuelto sea $< 1 \text{ mg L}^{-1}$), síntoma frecuente en los procesos de eutrofización, no suele depender de la entrada de nutrientes y posterior sedimentación de materia orgánica autóctona. Aunque en lagos es la situación más frecuente, en trabajos realizados por los investigadores de este estudio, se ha demostrado que este tipo de procesos en embalses depende directamente de la materia orgánica que entra desde los afluentes (Marcé et al 2008). Esto será especialmente cierto en sistemas con tiempos de residencia del agua bajos, con una fuerte componente advectiva, ya que en esos casos la materia orgánica generada *in situ* por los productores primarios supondrá un componente relativamente menos relevante comparado con la cantidad de materiales transportados desde la cuenca. Es por ello que se desaconseja la aplicación de modelos empíricos de carga-respuesta, muy utilizados en trabajos sobre anoxia en embalses, pero que suelen dar resultados muy poco fiables.

En nuestro caso hemos utilizado una aproximación de balance de masa para calibrar el efecto de las diferentes fuentes de materia orgánica y otros compuestos susceptibles de consumir el oxígeno del embalse. También se ha calculado el factor de anoxia (FA) para describir el proceso de generación de capas anóxicas en el embalse durante el año estudiado, con el fin de evaluar el grado de severidad de estos episodios.

5.2.1. Generación de capas anóxicas - Factor de Anoxia

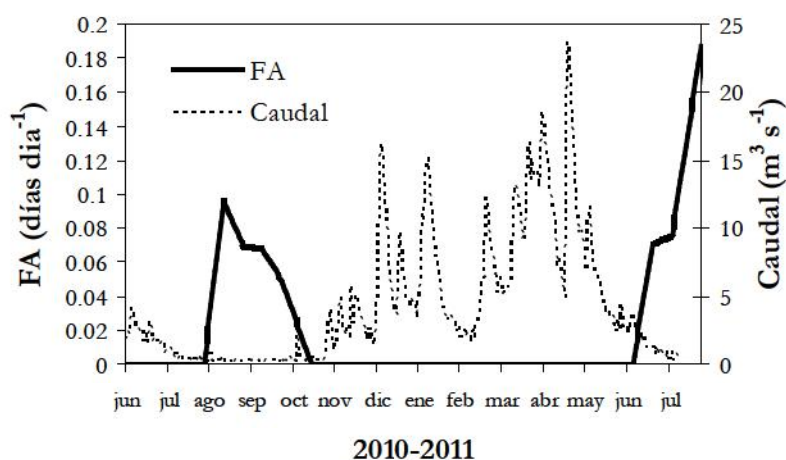
El factor de anoxia es una métrica muy utilizada para la evaluación del grado de severidad de los episodios de anoxia en un cuerpo de agua. Básicamente, se trata de normalizar el volumen de agua que presenta anoxia durante un muestreo, entre el volumen total de agua del embalse. Cuando este cálculo se expresa a escala anual (utilizando los datos de los diferentes muestreos realizados para interpolar la serie) se obtiene una estimación del grado de severidad de las situaciones de anoxia a escala anual:

$$FA(\text{días año}^{-1}) = \sum_{n=1}^{365} \frac{VA_n}{V_n}$$

Donde VA es el volumen anóxico durante el día n y V el volumen total durante el mismo día. Para calcular el volumen anóxico, la profundidad de la isopleta correspondiente a $1 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ se determinó a partir de los perfiles de oxígeno proporcionados por Canal de Isabel II, y el volumen correspondiente se calculó con la ayuda de una curva hipsográfica (la misma que se utilizó para calcular el volumen total diario). Los valores diarios entre fechas de muestreo se interpolaron linealmente. Obviamente, si toda el agua del embalse es anóxica durante un día determinado, el cálculo para ese día será igual a uno, con lo que a escala anual, el valor de FA viene a expresar cuántos días al año todo volumen del embalse sería anóxico si sumáramos los diferentes estados de anoxia. Por tanto, el cálculo de FA para un embalse totalmente anóxico durante todo el año tomaría un valor de $365 \text{ días año}^{-1}$. La ventaja de trabajar con una variable normalizada es que es posible comparar no sólo diferentes fechas de muestreo, sino también diferentes embalses.

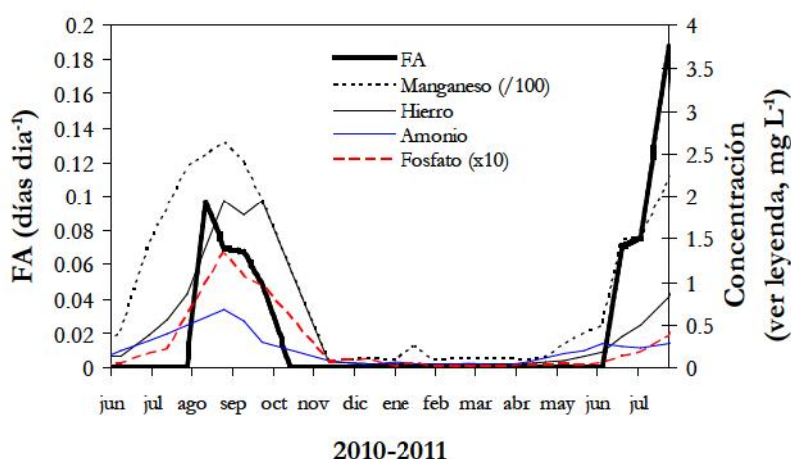
En la figura 230 se puede observar la evolución del **FA**, a escala diaria, para parte de los años 2010 y 2011. Se puede observar que la anoxia se acumula en los meses de verano, y parece que la mezcla invernal es suficiente para oxigenar las capas profundas de nuevo (hay que destacar que hay embalses en los que las situaciones de anoxia pueden perdurar durante los meses de invierno). En general, las situaciones de anoxia se concentran en periodos de bajo caudal, lo que indica que la advección puede jugar un papel en la existencia o no de capas anóxicas, aunque este hecho coincide en el tiempo con la estratificación térmica. Se observa también que, al menos durante el año estudiado, la fracción anóxica en Pinilla nunca fue superior al 20 por ciento del volumen de agua total.

FIGURA 230. EVOLUCIÓN DEL FACTOR DE ANOXIA Y RELACIÓN CON EL CAUDAL DE ENTRADA A LO LARGO DEL PERÍODO DE ESTUDIO



Respecto al cálculo de **FA** anual, el valor se sitúa en 6,4 días año⁻¹. Esto puede considerarse un valor muy moderado: puesto en contexto, es un valor más bajo que cualquiera de los calculados para el embalse de Sau durante toda su historia (29 días año⁻¹). Esto indica, en coincidencia con los modelos carga-respuesta de clorofila presentados en la sección anterior, que el proceso de eutrofización en Pinilla es moderado e incipiente. Esto no quiere decir que las capas anóxicas no creen problemas de gestión, o que la situación del embalse no pueda empeorar bruscamente ya que se sitúa al límite de las cargas de nutrientes admisibles, como se ha comentado anteriormente.

En efecto, la generación de capas anóxicas está íntimamente ligada al incremento espectacular de la concentración ponderada de metales, amonio y fosfato en el agua del embalse, lo que indica que más allá de la severidad comparada de la situación en Pinilla, la generación de capas anóxicas puede plantear complicaciones al sistema de abastecimiento y los sistemas acuáticos aguas abajo de Pinilla. Esto es especialmente importante si se tiene en cuenta la limitada capacidad para variar la profundidad de toma del agua que se desembalsa desde Pinilla.

FIGURA 231. EVOLUCIÓN DEL FACTOR DE ANOXIA Y RELACIÓN CON LA CONCENTRACIÓN DE AMONIO, FOSFATO, HIERRO Y MANGANESO A LO LARGO DEL PERÍODO DE ESTUDIO

5.2.2. Consumo de oxígeno en Pinilla - Balance de masas

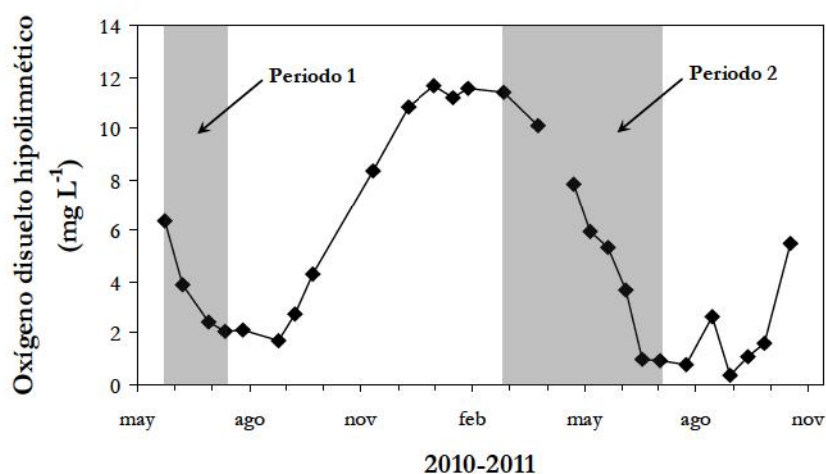
Aparte de las variables involucradas en la concentración de clorofila, una cuestión fundamental para entender cuáles son los aportes que afectan más la calidad del agua en el embalse de Pinilla es cuantificar el consumo potencial de oxígeno de cada uno de los aportes.

Ésta no es una cuestión trivial, ya que las medidas convencionales de la carga de materia orgánica (carbono orgánico disuelto y particulado, o demanda química de oxígeno) dan una idea de la cantidad de carbono que entra al sistema, pero no de la degradabilidad potencial de los materiales. Esto es una limitación muy clara en sistemas con tiempo de residencia corto, como los embalses, ya que sólo los materiales con un tiempo de degradabilidad inferior al tiempo de residencia del agua jugarán un papel en el consumo de oxígeno y, por lo tanto, en la generación de capas anóxicas.

En nuestro caso, la variable monitorizada más adecuada para intentar relacionarla con un balance de consumo de oxígeno es la demanda química de oxígeno (DQO), ya que el procesado de la muestra es suficientemente agresivo para suponer que en tiempos de residencia relativamente cortos (menos de un año) los procesos biológicos no serán capaces de degradar nada que el test de DQO no haya conseguido oxidar. El test de DQO nos da, por lo tanto, un límite superior para la cantidad de oxígeno que se puede degradar por la oxidación de los materiales de una muestra determinada (en nuestro caso nos centraremos en los aportes por afluentes y la depuradora de Pinilla). Normalmente los materiales causantes de la demanda de oxígeno serán materiales orgánicos, aunque también es posible que otros compuestos inorgánicos sumen a la demanda, particularmente el amonio, si se encuentra en concentraciones molares del mismo orden de magnitud que la DQO.

Sin embargo, hay una cuestión fundamental que la medida de DQO no aclara: la degradabilidad real de los materiales que entran al embalse. Obviamente, la agresividad del test de DQO oxidará materiales que no serán oxidados en condiciones reales por los organismos, así que la DQO sólo nos presenta un límite superior para el consumo de oxígeno. En este estudio hemos tomado ventaja del análisis presentado sobre la degradabilidad de los materiales orgánicos por fluorescencia para afinar el balance de consumo de oxígeno potencial de los diferentes aportes.

Básicamente, se ha comparado el consumo potencial de oxígeno por los diferentes aportes, con el consumo total de oxígeno observado en el hipolimnion del embalse (de 10 metros de profundidad hasta el fondo), durante los dos periodos de generación de capas anóxicas observados (Figura 232).

FIGURA 232. CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN EL HIPOLIMNION DEL EMBALSE DE PINILLA, A LO LARGO DEL PERIODO DE ESTUDIO

En sombreado se marcan los periodos en los que se aplicó el balance de masas de oxígeno hipolimnético, en los que se produce un descenso de la concentración de oxígeno

La comparación entre el balance de oxígeno y la degradabilidad potencial de los materiales aportados al embalse se ha de ajustar de forma razonable, con una porción no explicada, que ha de vincularse con la respiración por los sedimentos, con unos valores bastante acotados en la bibliografía (Beutel 2003). Estos valores varían entre 0,06 y 2 g O₂ m⁻² día⁻¹, dependiendo del grado de eutrofia del sistema, y para un embalse recibiendo cargas de fósforo como las de Pinilla, aproximaciones clásicas (Chapra 1997) predicen un valor del orden de 0,5 g O₂ m⁻² día⁻¹.

Para cada uno de los dos periodos, el flujo de trabajo para estos cálculos ha sido el que se refleja en la figura 233, y que se pasa a detallar seguidamente.

Cálculo del balance de oxígeno hipolimnético

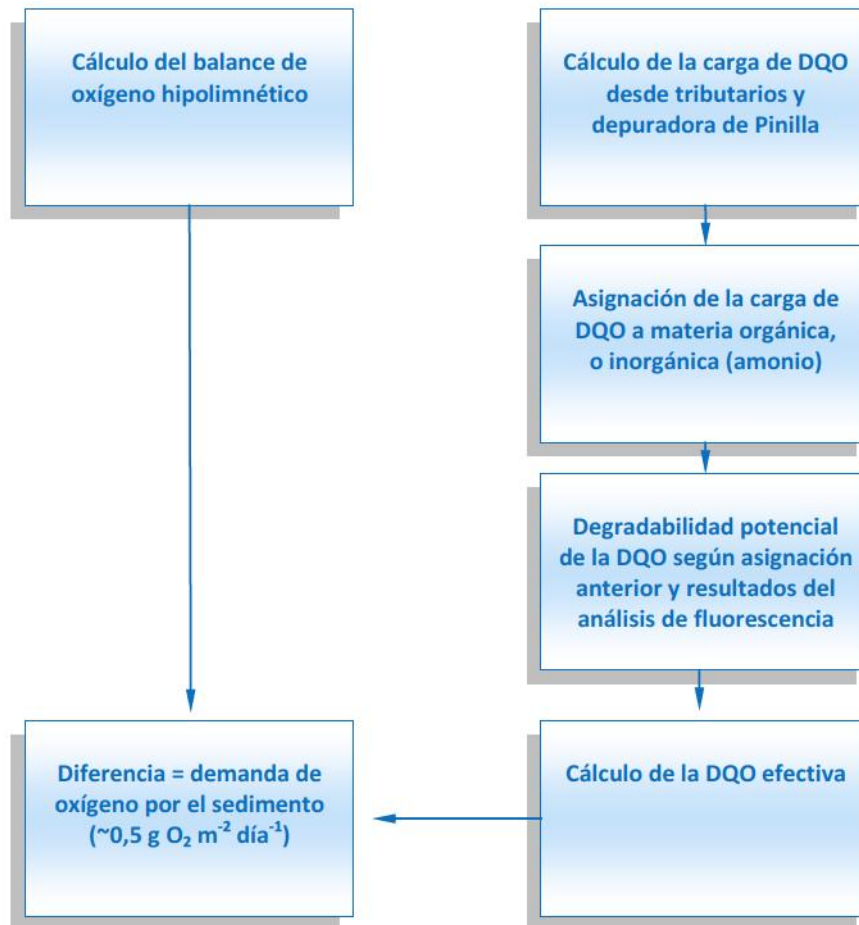
Para cada uno de los dos periodos, se ha calculado el consumo aparente de oxígeno en el hipolimnion según la formulación:

$$\text{Consumo aparente de } O_2 (10^6 \text{ kg}) = \Delta O_2 + k \cdot O_{2input} - O_{2output}$$

Donde ΔO_2 es la variación de la cantidad de oxígeno contenida en el hipolimnion entre el inicio y final del periodo, O_{2input} es la cantidad de oxígeno que ha entrado al embalse desde los tributarios, y $O_{2output}$ la cantidad evacuada por desembalses (se asumió una concentración correspondiente con la profundidad a la que se extrae el agua en Pinilla, a partir de los perfiles medidos en campo). k es un parámetro que representa la cantidad de oxígeno que entra desde tributarios y depuradora, que llega efectivamente al hipolimnion, ya que no todo el agua que entra llegará al hipolimnion debido a procesos de mezcla en los puntos de hundimiento.

Debido a la diferencia de temperatura entre el río y el agua superficial del embalse, es de esperar que gran parte del agua que entra al embalse acabe en las capas profundas del embalse, pero en el punto de hundimiento cierta mezcla es también esperable. Considerando la tipología del embalse y los caudales de entrada durante los periodos considerados, se ha considerado un valor de $k = 0,85$ que, por otra parte, es el valor más frecuente.

FIGURA 233. FLUJO DE TRABAJO SEGUIDO PARA LA COMPARACIÓN ENTRE EL BALANCE DE OXÍGENO Y LA DEGRADABILIDAD POTENCIAL DE LOS MATERIALES APORTADOS AL EMBALSE



Cálculo de la carga de DQO desde tributarios y depuradora de Pinilla

La carga de DQO entrada desde los tributarios y depuradora se ha calculado basados en los resultados diarios obtenidos mediante el método LOADEST, presentados en otras secciones de este documento.

Asignación de la carga de DQO a materia orgánica, o inorgánicos (amonio)

La carga de DQO se asignó a materia orgánica o inorgánicos (amonio), teniendo en cuenta los valores de amonio medidos en las muestras tomadas durante este estudio. Se consideró que el amonio sería oxidado totalmente a nitrato en el embalse, lo que da una relación molar de 2 mol de O₂ consumido por mol de amonio nitrificado, considerando la estequiometría de nitrificación más común por Nitrosomas y Nitrobacter. No se consideró que ningún otro compuesto inorgánico en las muestras podía afectar al balance de oxígeno. Este cálculo se efectuó tanto en los efluentes, como en la depuradora. La cantidad de DQO no explicada por amonio se asignó a la materia orgánica.

Degradabilidad potencial de DQO según asignación anterior y resultado del análisis de fluorescencia

Se consideró que toda la DQO por amonio sería efectiva al 100 por cien en el embalse, ya que el amonio suele nitrificarse de forma eficiente. Por lo que respecta a la DQO asignada a materia orgánica, se utilizó la información de la degradabilidad de los diferentes componentes encontrados en el análisis PARAFAC para tener una estima de la fracción de esta DQO que sería efectiva en el embalse. Para ello se calculó, para cada afluente y depuradora, el porcentaje de presencia de los diferentes componentes PARAFAC encontrados en las muestras. Desde aquí, y utilizando el porcentaje de degradabilidad observada para cada componente, la DQO efectiva para cada entrada se calculó según la fórmula:

$$DQO_{m.o. efectiva} (10^6 \text{ kg}) = k \cdot \sum_{n=1}^4 C_n \cdot D_n \cdot DQO_L$$

Donde k es el factor de dilución definido anteriormente, C_n es el porcentaje de presencia del componente PARAFAC n en el tributario (para un total de 4), D_n es la degradabilidad del componente n , y DQO_L es a carga de DQO desde el tributario.

Cálculo de la DQO efectiva

La DQO efectiva total para un tributario en cuestión (o la depuradora) será la suma de la DQO efectiva por amonio y la DQO efectiva por materia orgánica calculada anteriormente. La suma de esta DQO efectiva para todos los tributarios nos da el valor definitivo de DQO efectiva para el periodo considerado.

Diferencia = demanda de oxígeno por el sedimento ($\sim 0,5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

La diferencia entre el balance de oxígeno hipolimnético y el cálculo de la DQO efectiva para un periodo es la cantidad de oxígeno consumida por procesos de respiración en el sedimento. *A priori*, la magnitud de este valor debería estar cerca de $0,5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, y la diferencia entre un periodo y el otro debería ser pequeña.

En las tablas 39 y 40 se resumen los resultados del balance definido anteriormente para los dos periodos considerados (si no se indica lo contrario, resultados en 10^6 kg).

TABLA 39. COMPONENTES SELECCIONADOS DEL BALANCE DE OXÍGENO HIPOLIMNÉTICO EN EL EMBALSE DE PINILLA PARA LOS DOS PERIODOS CONSIDERADOS EN LA FIGURA 232

Periodo	ΔO_2	O_{2input}	$O_{2output}$	DQO_L (depuradora)	DQO efectiva (depuradora y debida a NH_4^+)	DQO_L (tributarios)	DQO efectiva (tributarios y debida a NH_4^+)
1	22	63	28	3,7	3,5 (3,1)	24	9,3 (0,2)
2	51	917	640	4,4	4,2 (4,0)	243	99,0 (12,8)

TABLA 40. COMPONENTES SELECCIONADOS DEL BALANCE DE OXÍGENO HIPOLIMNÉTICO EN EL EMBALSE DE PINILLA PARA LOS DOS PERIODOS CONSIDERADOS EN LA FIGURA 232

Periodo	Consumo aparente de O_2	DQO efectiva TOTAL	% de consumo aparente por tributarios	% de consumo aparente por depuradora	% de consumo aparente por sedimento	Demanda del sedimento ($\text{g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)
1	47,5	12,8	20	7	73	0,69
2	189,7	103,2	52	2	46	0,59

En la primera tabla se puede observar que la variación de oxígeno en el hipolimnion fue más acusada en el segundo periodo (como puede apreciarse, por otra parte, en la figura anterior). También fueron más grandes las magnitudes del oxígeno intercambiado por advección. En ambos casos, el balance de entradas y salidas es favorable a la acumulación de oxígeno, con lo que el consumo aparente toma valores más elevados que la simple variación de oxígeno en la columna de agua entre el final e inicio de cada periodo (ver segunda tabla). En lo que respecta a la carga de **DQO (DQOL)**, se puede observar que la carga proveniente de la cuenca es siempre mucho mayor que la carga desde la depuradora de Pinilla. Esto es especialmente cierto en el segundo periodo, definido por grandes entradas de agua desde los tributarios. El cálculo de la carga efectiva matiza un poco estas diferencias, ya que la **DQO** de la depuradora proviene fundamentalmente del amonio y de materia orgánica rica en aminoácidos (componente 4 en el análisis PARAFAC), dos materiales con degradabilidad al 100 por cien en el embalse. Esto hace que las magnitudes de **DQO** efectiva por depuradoras y tributarios sean comparables en el primer periodo. En el segundo periodo, la carga de **DQO** efectiva desde los tributarios continúa siendo muy superior.

En la segunda tabla se puede apreciar un consumo aparente de oxígeno mayor en el segundo periodo. Esto se corresponde con una carga de **DQO efectiva Total** también más elevada que, como se ha visto anteriormente, proviene básicamente de los tributarios. De hecho, se puede afirmar que el consumo de oxígeno por materiales aportados por la depuradora no será en condiciones normales mayor del 10 por cien del consumo total en un periodo de estratificación.

Es importante señalar que el consumo de oxígeno por el sedimento se estima en un valor alrededor de $\sim 0,64 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, lo que se acerca de forma muy razonable al valor de referencia de $0,5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Además, los valores encontrados para uno y otro periodo son muy parecidos entre ellos, como era preceptivo. Por lo tanto, consideramos que los cálculos realizados, aunque no son más que una aproximación, deben ser un reflejo fidedigno del balance de oxígeno en el embalse durante los dos periodos analizados. Es de destacar que la demanda de oxígeno por el sedimento es una parte sustancial del consumo total en el hipolimnion.

5.3. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE LAS POBLACIONES DE FITOPLANCTON EN EL EMBALSE DE PINILLA Y ESTABLECIMIENTO DE REGLAS EMPÍRICAS PARA SU EVOLUCIÓN TEMPORAL

En este apartado se describe la evolución de los grupos algales observada en el embalse de Pinilla durante el periodo comprendido entre los años 2010 y 2011. Para ello, se ha trabajado con la concentración de clorofila registrada en cada muestreo y la descripción del grupo fitoplanctónico dominante, de acuerdo a la tipología establecida por los técnicos de Canal de Isabel II (Cianobacterias, Criptófitos, Diatomeas y Diversidad).

Para realizar una aproximación a la evolución temporal, estos datos se han relacionado con las aportaciones de caudal al embalse, tal como aparece representado en la figura 234. De esta manera, puede observarse que el grupo que domina durante un mayor periodo de tiempo son los Criptófitos, seguidos por las Cianobacterias, los periodos de Diversidad y las Diatomeas.

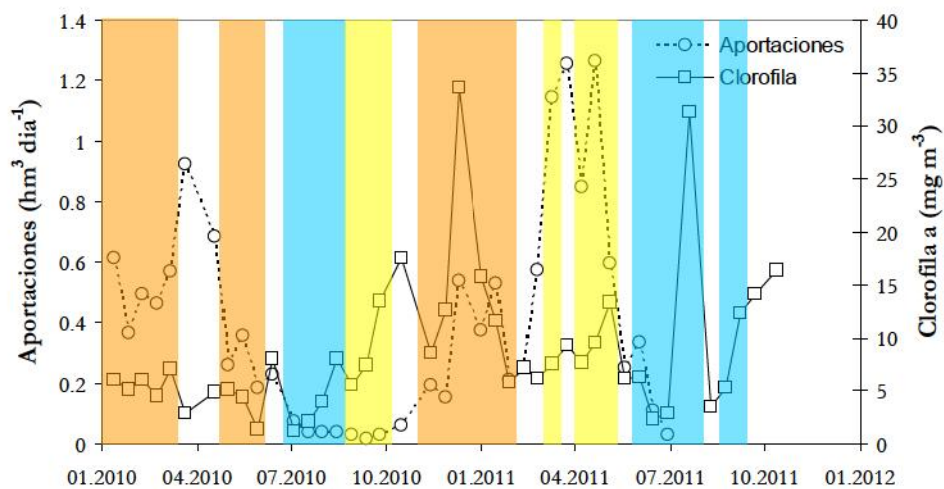
Los Criptófitos aparecen ligados a aportes de caudal medios, dominando durante los meses de invierno, así como a finales de la primavera de 2010. Aparecen a concentraciones de clorofila situadas entre los 5 y los 15 mg m^{-3} , llegando a alcanzar el máximo registrado durante el periodo considerado, con un pico cercano a los 35 mg m^{-3} en diciembre de 2010. Dado el carácter mixotrófico de este grupo, capaz de desarrollar un metabolismo heterótrofo para degradar la materia orgánica, es presumible que sea esta cualidad la que le da ventaja para desarrollarse en periodos con aportes moderados de materia orgánica y escasez de horas de luz. Su dominio concluye a finales del invierno, con la llegada de fuertes entradas de caudal, en las que ningún grupo domina la composición del fitoplancton (Diversidad). A finales de la primavera de 2010, estas entradas se mantienen a un nivel medio, que de nuevo propicia el dominio de los Criptófitos hasta el inicio del verano.

Las Cianobacterias, por su parte, son el grupo que domina con claridad la composición algal durante los meses estivales. Aparecen ligadas al descenso del caudal y a la llegada del verano, con concentraciones de clorofila, por lo general no muy altas ($< 10 \text{ mg m}^{-3}$); si bien llegaron a experimentar un pico superior a los 30 mg m^{-3} en el verano de 2011. Su dominio concluye con el aumento de las aportaciones de caudal y el descenso de horas de luz que acontece con la entrada del otoño.

Por último, las Diatomeas, con un carácter más oportunista, son las que presentan un comportamiento menos previsible, dominando la composición fitoplanctónica tanto en los meses de otoño como en primavera, así como con caudales de entrada bajos o elevados. Las concentraciones de clorofila a las que las diatomeas aparecen están entre los 5 y los 15 mg m^{-3} . Su dominio termina con la llegada del invierno o del verano, seguido de una breve fase de diversidad.

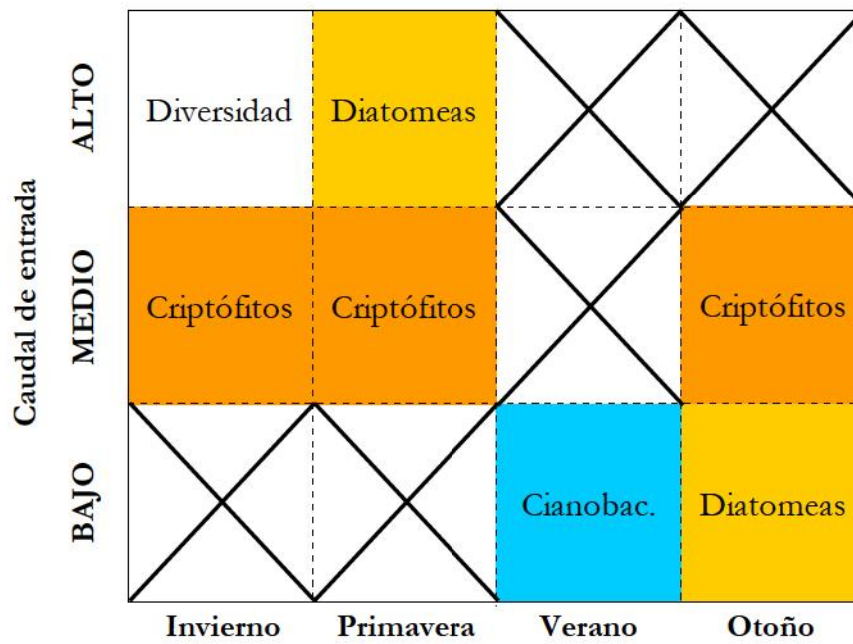
De acuerdo a lo visto anteriormente, se ha establecido una sencilla relación entre el grupo dominante en la composición del fitoplancton, el caudal de entrada y la estación del año. Ésta se presenta de forma esquemática en la figura 235. Así, los Criptófitos aparecen asociados a caudales de entrada medios, tanto en invierno, como en primavera y otoño. Las Cianobacterias se limitan exclusivamente al caudal bajo del verano; mientras que las Diatomeas dominarían en primavera, con caudales altos, o en otoño con caudal bajo. Las situaciones sin el dominio concreto de ningún grupo estarían ligadas a situaciones de caudal elevado durante los meses de invierno. Se descartan el resto de situaciones posibles (señaladas con una cruz), raramente observables en el sistema que nos ocupa.

FIGURA 234. EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA Y LAS APORTACIONES DE CAUDAL EN EL EMBALSE DE PINILLA ENTRE LOS AÑOS 2010 Y 2011

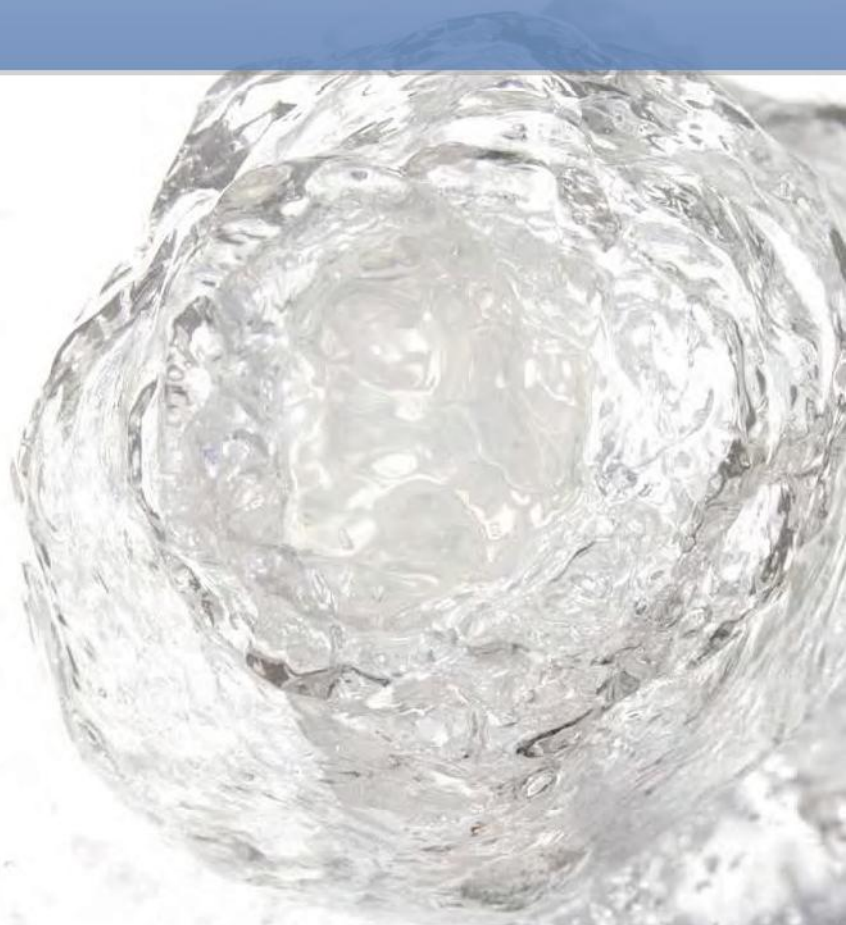


Sombreados en diferentes colores aparecen los periodos en los que la composición fitoplanctónica estuvo dominada por un determinado grupo (naranja-marrón = criptófitos; azul = cianobacterias; amarillo = diatomeas; blanco = diversidad)

FIGURA 235. RELACIÓN ENTRE ESTACIÓN DEL AÑO, CAUDAL DE ENTRADA Y COMPOSICIÓN ALGAL EN EL EMBALSE DE PINILLA

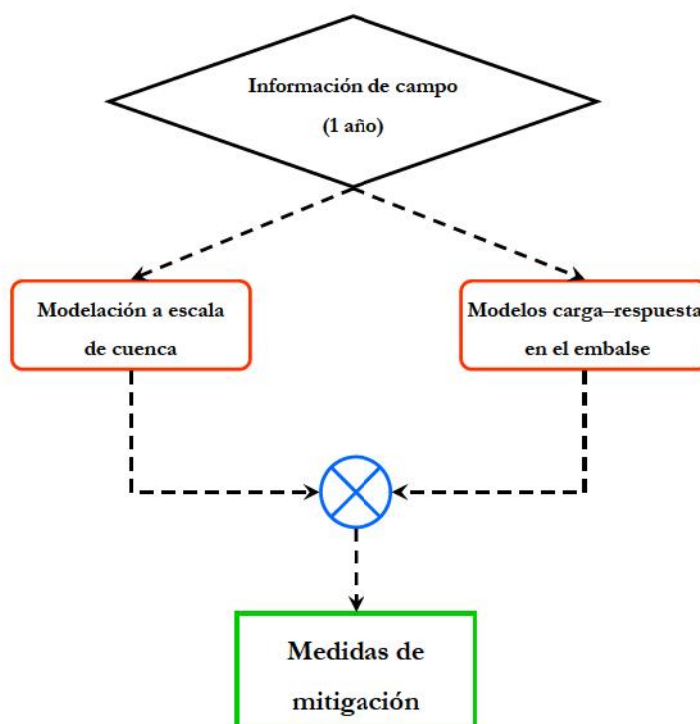


6. Generación de escenarios



Una vez se han identificado modelos para la predicción de variables particulares relacionadas con la evolución de la calidad del agua del embalse de Pinilla, se pueden elaborar propuestas alternativas con diferentes grados de actuación en la cuenca, cada una con su análisis de beneficios. La pretensión es aprovechar toda la información generada durante el proyecto, combinando los modelos carga-respuesta y la modelación a escala de cuenca para generar las recomendaciones de gestión para la mitigación del proceso de eutrofización de Pinilla (ver Figura 236).

FIGURA 236. FLUJO DE TRABAJO EN EL MARCO DE ESTE APARTADO, QUE INCLUYE LA UTILIZACIÓN CONJUNTA DE LOS DATOS DE CAMPO, DE LOS MODELOS DE CUENCA Y DEL EMBALSE PARA LA DEFINICIÓN DE ESCENARIOS APROPIADOS PARA MITIGAR EL PROCESO DE EUTROFIZACIÓN DE PINILLA



En esta sección presentamos diversos escenarios de reducción de materiales aportados al embalse de Pinilla, con la utilización conjunta de los modelos de cuenca y empíricos para la predicción de la concentración de clorofila y el desarrollo de capas anóxicas en el embalse. El objetivo último es evaluar los escenarios para listar una serie de recomendaciones sobre cuáles serían las actuaciones más convenientes para la mitigación del proceso de eutrofización en el embalse.

6.1. GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CARGAS DE NUTRIENTES Y MATERIA ORGÁNICA DESDE LA CUENCA Y SU IMPACTO EN EL PROCESO DE EUTROFIZACIÓN DEL EMBALSE DE PINILLA

En esta sección se evalúan los diferentes escenarios de reducción de la carga de nutrientes y materia orgánica desde la cuenca y su impacto en el embalse.

Para la definición de estos escenarios se han tenido en cuenta diferentes criterios:

1. Aunque se han definido algunos escenarios muy optimistas, se ha intentado evitar formular situaciones no realistas. Por ello, los escenarios se han enfocado siempre en la reducción de las aportaciones por actividades humanas, sin considerar las aportaciones naturales desde la cuenca.
2. La depuradora de Pinilla ha tenido un papel destacado en casi todos los escenarios, ya que potencialmente se trata del aporte más fácilmente gestionable por Canal de Isabel II.
3. Se ha enfocado el análisis en los constituyentes que juegan un papel en los diferentes modelos empíricos construidos. Claramente, una variable no incluida en estos modelos no puede darnos una idea del impacto de su reducción en la calidad el agua del embalse. Los constituyentes considerados fueron: PT, NT, Amonio, y DQO, incluyendo la información de la tipología de materia orgánica por fluorescencia.

Los escenarios se han dividido en grupos, atendiendo al modelo de carga-respuesta asociado. De esta forma, se identifica claramente cuál es la diana de cada agrupación de escenarios.

6.1.1. Escenarios para la reducción de la concentración de clorofila en el embalse

Este epígrafe trata con los modelos carga-respuesta para la concentración de clorofila. Por ello, se centra en la reducción de la carga de Fósforo Total y Nitrógeno Total desde los tributarios, ya que los modelos construidos son forzados básicamente por estas dos variables. Tanto los modelos de carga-respuesta clásicos como las redes neuronales son utilizados aquí. Seguidamente se describen los escenarios que se han definido.

6.1.1.1. Escenarios para el Fósforo Total

Como se ha detallado en otros apartados de esta memoria, el origen de los aportes de Fósforo Total varía en función de la importancia de las entradas de agua desde los tributarios. Así, en el primer periodo seco, la importancia de la depuradora de Pinilla es muy alta, y baja a medida que los caudales aumentan. Aun así, su importancia se mantiene significativa durante todo el periodo de estudio. Por otra parte, los aportes desde el uso **URBANO** de suelo y desde el definido como **PRADOS** son también importantes, especialmente cuando los caudales son altos. Esto apunta hacia un impacto humano desde estos usos de suelo, siendo el uso **URBANO** paradigmático a este respecto. El uso **PRADOS** se puede relacionar con las explotaciones agrícolas, aunque la heterogeneidad de este uso hace difícil una estimación concreta del grado de impacto humano causante de los aportes desde este uso. Se han utilizado los porcentajes de aportes calculados por el modelo SPARROW para variar la carga total observada y generar así los escenarios.

Se han propuesto los escenarios resumidos en la tabla 41. Se incluye un escenario idealizado, que se correspondería con la reducción prácticamente al 100 por cien de los aportes humanos; una reducción decidida, pero posible, de estas cargas; y un escenario más realista que considera sólo la depuradora, que es el aporte más fácilmente gestionable por Canal de Isabel II. Se ha definido un 100 por cien, no porque sea el porcentaje de reducción más realista, sino para ejemplificar la potencialidad de las actuaciones que sólo consideran la depuradora.

TABLA 41. ESCENARIOS PROPUESTOS PARA EL FÓSFORO TOTAL

Escenario	Definición	Reducción de carga en % respecto al total		
		Uso URBANO	Uso PRADOS	Depuradora
PT1	Idealizado	100	50	100
PT2	Actuación decidida	50	0	70
PT3	Realista	0	0	100

Modelo anual de carga-respuesta para la concentración de clorofila

Los resultados de la aplicación de los diferentes escenarios sobre los modelos para la concentración media de clorofila se pueden consultar en la tabla 42.

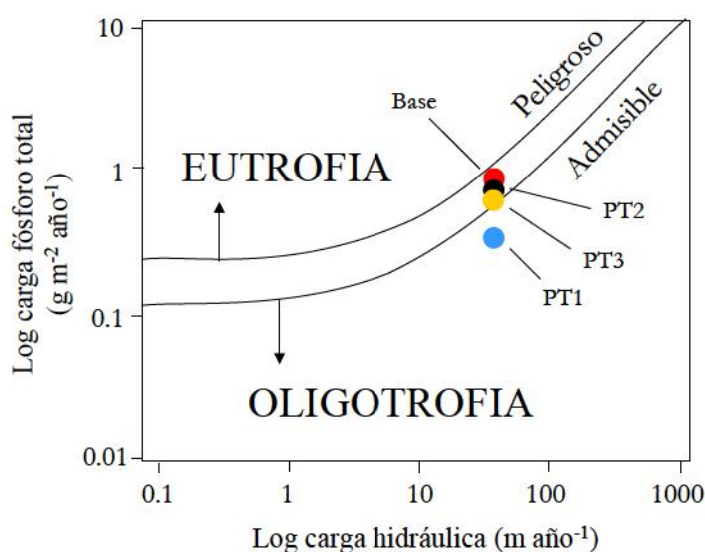
TABLA 42. RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS PARA EL FÓSFORO TOTAL

Escenario	Definición	Respuesta Chl a ($mg\ m^{-3}$)	% respecto Base
Base	Observado	5,58	100
Escenario PT1	Idealizado	3,78	68
Escenario PT2	Actuación decidida	5,15	92
Escenario PT3	Realista	4,88	88

Se puede observar que los escenarios PT2 y PT3 dan resultados similares. El resultado para la clorofila de PT3 es más bajo que el de PT2, lo que da una idea de la importancia de los aportes desde la depuradora, con lo que parece que la actuación en la depuradora debiera ser prioritaria en caso de una actuación moderada. El escenario idealizado supone una reducción mucho más acusada, con lo que queda claro que una actuación a nivel de cuenca sería muy beneficiosa para el embalse.

En cuanto a la situación del embalse respecto al riesgo de situaciones de eutrofia, se pueden consultar los resultados en la figura 237.

Se evidencia que una actuación a escala de cuenca sobre las aportaciones por actividades humanas tendría un impacto muy beneficioso en el embalse, situándolo muy lejos del umbral para la eutrofización. Esto se podría considerar como una situación de referencia para el embalse. El resto de actuaciones, aunque más modestas, tienen un efecto perceptible sobre el riesgo de eutrofia, con lo que son válidas las mismas precisiones formuladas para el modelo anterior.

FIGURA 237. DIAGRAMA DE VOLLENWEIDER, CON LA POSICIÓN DEL EMBALSE DE PINILLA EN LA SITUACIÓN BASE Y EN CADA UNO DE LOS TRES ESCENARIOS GENERADOS PARA EL FÓSFORO TOTAL

6.1.1.2. Escenarios para el Nitrógeno Total (con referencia al amonio)

Los resultados respecto al porcentaje de importancia de cada fuente respecto al Nitrógeno Total identificaron claramente al uso **PRADOS** como el principal origen de Nitrógeno Total. Esto se da tanto en condiciones de alto como de bajo caudal, aunque en situaciones de bajo caudal las aportaciones urbanas y de la depuradora ganan mucha importancia. Al menos en el caso de la depuradora su importancia viene dada por la fuerte carga de amonio en el primer periodo.

Siguiendo la metodología y criterios expuestos anteriormente para el Fósforo Total, se han definido los escenarios detallados en la tabla 43.

TABLA 43. ESCENARIOS PROPUESTOS PARA EL NITRÓGENO TOTAL (con referencia al amonio)

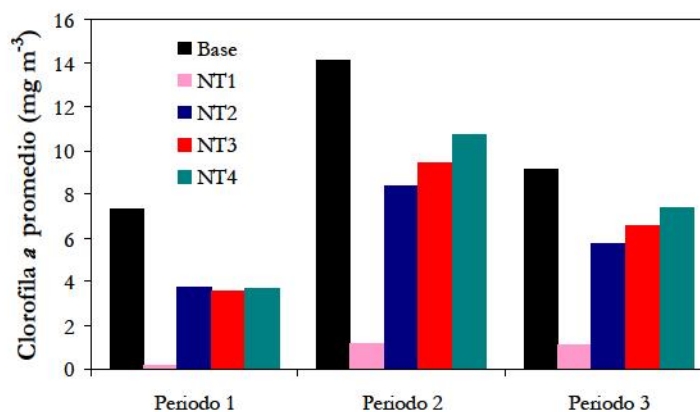
Escenario	Definición	Reducción de carga en % respecto al total		
		Uso URBANO	Uso PRADOS	DEPURADORA
Escenario NT1	Idealizado	100	50	100
Escenario NT2	Actuación decidida	50	0	70
Escenario NT3	Realista	0	0	100
Escenario NT4	Realista (enfocado a NH_4^+)	0	0	100 del NH_4^+

Se incluye, por lo tanto, un escenario idealizado que se correspondería con la reducción prácticamente al 100 por cien de los aportes humanos (una reducción decidida, pero posible, de estas cargas), y un escenario más realista que considera sólo la depuradora, que es el aporte más fácilmente gestionable por Canal de Isabel II. Se ha definido un 100 por cien, no porque sea el porcentaje de reducción más realista, sino para ejemplificar la potencialidad de las actuaciones que sólo consideran la depuradora. Finalmente, se ha considerado un escenario en el que sólo se actúa a nivel del amonio en la depuradora, con un 100 por cien de efectividad. Como en el caso anterior, no se considera que esta reducción del total de la carga de amonio por la depuradora sea realista, sino que se quiere perfilar la potencialidad de esta actuación.

Modelo estacional de carga-respuesta para la concentración de clorofila

Pese a que la capacidad de generalización de este modelo ya se ha definido como dudosa, incluimos aquí los resultados de la aplicación de los escenarios a este modelo. Hay que considerar, por lo tanto, todas las precisiones y cautelas expresadas en los apartados anteriores para este modelo. Los resultados de la aplicación de los diferentes escenarios sobre el modelo para la concentración estacional media de clorofila se resumen en la figura 238.

FIGURA 238. RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS SOBRE EL MODELO DE CARGA-RESPUESTA PARA LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA



Se puede apreciar que los resultados para el escenario NT1 no son realistas, probablemente debido a que la aproximación lineal del modelo, basada en tan sólo tres puntos, no es extrapolable a los valores de cargas de este escenario.

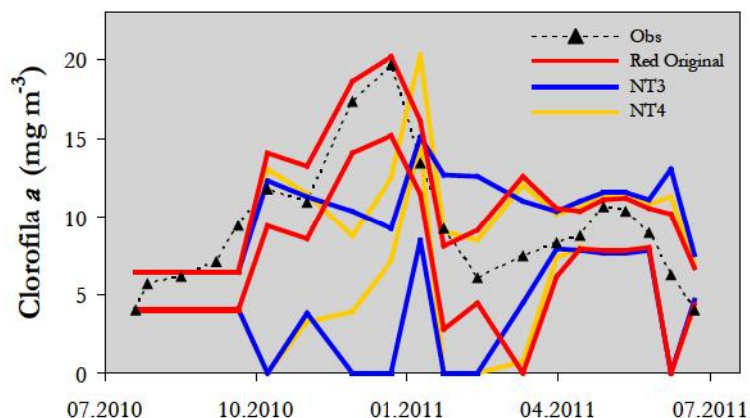
Con toda probabilidad, los valores promedios no bajarían más allá de los $\sim 4 \text{ mg m}^{-3}$, que es el límite inferior anual para las cargas de PT que soporta el embalse.

Más allá de este resultado, resulta evidente que el modelo que controla las cargas de amonio en la depuradora (NT4) es el más interesante para el control de la concentración de clorofila, ya que los resultados son muy similares al resto de modelos. En general los resultados muestran para todos los escenarios una disminución moderada pero no despreciable de las concentraciones de clorofila.

Modelo de red neuronal para la concentración de clorofila

Como vimos en secciones anteriores, el modelo neuronal que incluía el Nitrógeno Total era el más adecuado para describir las oscilaciones de la concentración de clorofila a corto término. Se han aplicado los escenarios anteriores a este modelo. Hay que destacar que, al igual que en el caso anterior, los resultados para NT1 y NT2 no son realistas. Esto se debe a que los datos de entrada para estos escenarios se alejan demasiado de los utilizados para entrenar la red neuronal. Esto, combinado con la escasez de datos disponibles para la calibración, hace que el modelo no pueda generalizar resultados hasta los extremos que demandan estos escenarios.

Se resumen en la figura 239 los resultados para los escenarios NT3 y NT4, expresados como el área de incertidumbre de los resultados entre los intervalos de confianza del 95 por ciento, comparados con el modelo original.

FIGURA 239. RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS NT3 Y NT4 SOBRE EL MODELO DE RED NEURONAL PARA LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA

Se puede observar que en los dos escenarios disminuye de forma significativa el pico de clorofila invernal, aunque en el escenario NT4 persiste un pico de clorofila superior a 15 mg m^{-3} . Los dos escenarios coinciden en que los aumentos de clorofila invernales se retrasan en el tiempo casi dos meses. El impacto de las medidas consideradas en los escenarios es inapreciable durante el resto del año. Por lo tanto, y aunque la eliminación del amonio desde la depuradora de Pinilla podría tener un efecto apreciable en el desarrollo de poblaciones algales en el embalse, parece que el control adicional de otras formas de nitrógeno (particularmente el nitrato, la especie más abundante en el conjunto del Nitrógeno Total) puede resultar en un control más efectivo de la cantidad de clorofila.

6.1.2. Escenarios para la maximización de la concentración de oxígeno en el hipolimnion del embalse

Este subapartado trata con los modelos de balance de masas para la concentración de oxígeno en el hipolimnion. Por ello, se centra en la reducción de la carga de amonio y la DQO desde los tributarios, ya que el balance construido está forzado básicamente por estas dos variables. Se ha utilizado también la caracterización de la materia orgánica por fluorescencia y PARAFAC para completar este análisis. Seguidamente se describen los escenarios que se han definido.

6.1.2.1. Escenarios para el Amonio

El amonio representa un compuesto especial en este estudio, ya que se trata de uno de los pocos constituyentes para los cuales los aportes por la depuradora de Pinilla son los mayoritarios, al menos en alguno de los tres periodos considerados en este estudio.

Los usos **URBANOS** y **PRADOS** también pueden tener un papel importante en los periodos con más aportaciones de caudal desde los tributarios. *A priori*, esto apuntaría a la posibilidad de un control efectivo del efecto del amonio sobre el consumo de oxígeno en el embalse. Siguiendo la metodología y los criterios expuestos anteriormente para los escenarios de control de la concentración de clorofila, se han definido los escenarios que se pueden consultar en la tabla 44.

Se incluye, por lo tanto, un escenario idealizado que se correspondería con la reducción prácticamente al 100 por cien de los aportes humanos, una reducción decidida, pero posible, de estas cargas, y un escenario más realista que considera sólo la depuradora, que es el aporte más fácilmente gestionable por Canal de Isabel II. Se ha definido un 100 por cien, no porque sea el porcentaje de reducción más realista, sino para ejemplificar la potencialidad de las actuaciones que sólo consideran la depuradora.

TABLA 44. ESCENARIOS PROPUESTOS PARA EL AMONIO

Escenario	Definición	Reducción de carga en % respecto al total		
		Uso URBANO	Uso PRADOS	DEPURADORA
Escenario NH1	Idealizado	100	50	100
Escenario NH2	Actuación decidida	50	0	70
Escenario NH3	Realista	0	0	100

Balance de masas para el oxígeno hipolimnético

Para la resolución de los diferentes escenarios en el balance de masas, se han seguido las siguientes directrices:

1. El consumo de oxígeno hipolimnético por el sedimento se ha considerado constante según el valor obtenido en el balance original (ver Tabla 40).
2. Para la diferenciación del consumo por oxidación del amonio por diferentes usos del suelo, se han utilizado los porcentajes obtenidos por el modelo SPARROW, aplicados a las cargas observadas de amonio. De esta forma se aprovecha la información de la modelación sin incluir en el análisis los errores inherentes a la misma.

Los resultados para cada escenario se detallan en la tabla 45, comparados con el balance original.

TABLA 45. RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS PARA EL AMONIO

Periodo	Consumo aparente de O ₂	DQO efectiva TOTAL	DQO efectiva (depuradora y debida a NH ₄ ⁺)	DQO efectiva (tributarios y debida a NH ₄ ⁺)	O ₂ final (mg L ⁻¹)	% mejora respecto al O ₂ final	Mejora respecto al O ₂ final (mg L ⁻¹)
BALANCE ORIGINAL							
1	47,5	12,8	3,5 (3,1)	9,3 (0,2)	2,1	-	-
2	189,7	103,2	4,2 (4,0)	99,0 (12,8)	1,0	-	-
NH1							
1	44,2	9,6	0,43 (0,0)	9,1 (0,04)	2,7	29	0,61
2	177,9	91,4	0,20 (0,0)	91,2 (5,1)	2,8	191	1,84
NH2							
1	45,3	10,6	1,34 (0,9)	9,27 (0,16)	2,5	20	0,41
2	185,1	98,6	1,41 (1,2)	97,2 (11,0)	1,7	75	0,72
NH3							
1	44,4	9,8	0,43 (0,0)	9,3 (0,23)	2,7	27	0,57
2	185,7	99,2	0,19 (0,0)	99,0 (12,8)	1,6	66	0,63

Se puede observar un efecto significativo de todos los escenarios en la concentración final de oxígeno en el hipolimnion. Si se exceptúa el NH1, los aumentos finales están alrededor de 0,5 mg L⁻¹. Las concentraciones finales se sitúan por encima de 2,5 mg L⁻¹ para el primer periodo, y en el segundo periodo por debajo de 3,0 mg L⁻¹. Esto es significativo, ya que se ha observado en el embalse que concentraciones promedio, en el hipolimnion, superiores a 2,5 mg L⁻¹ parecen inhibir de forma sustancial la redisolución de metales y otras sustancias reducidas desde el sedimento. Por lo tanto, no parece que el control exclusivo del amonio en gran parte de los usos urbanos y/o en la depuradora de Pinilla sea suficiente para impedir que el sedimento tenga un papel de carga interna para determinados compuestos.

6.1.2.2. Escenarios para la DQO

Para la generación de escenarios de reducción de la carga de DQO al embalse se ha tenido muy en cuenta el origen potencial de la demanda. Esto se ha considerado ya que la DQO está controlada por un conjunto muy heterogéneo de sustancias. Algunas de ellas pueden considerarse sujetas a gestión, mientras que, para otras, no es nada realista considerarlas una opción de gestión. Por ejemplo, los materiales húmicos provenientes del lavado de suelos forestales pueden resultar una fracción significativa de la DQO, pero su gestión es, a todos los efectos prácticos, irrealizable. Es por eso que sólo se ha considerado la DQO generada por materia orgánica asignada al componente 4 obtenido en PARAFAC. Se recordará que este componente se asociaba a una fracción rica en aminoácidos, y que se vinculó directamente a la materia orgánica de origen humano en la cuenca.

Para trabajar exclusivamente con el componente 4 (C4) de la DQO primero se calculó la DQO proveniente de la oxidación del amonio, para lo que se utilizó la carga de amonio correspondiente. Una vez descontada la demanda de oxígeno por nitrificación de la DQO se asignó un porcentaje a cada componente de materia orgánica PARAFAC según los resultados obtenidos en el análisis espectroscópico. Sólo la fracción correspondiente a C4 estuvo sujeta a gestión en los escenarios, mientras que el resto de fracciones se dejaron intactas después de recalcular las fracciones correspondientes.

Como para los diferentes componentes PARAFAC no conocemos los orígenes porcentuales por usos de suelo, no es posible aquí definir escenarios con proporciones diferenciadas para distintos usos del suelo en la cuenca. En cambio, se han aplicado escenarios que aplican reducciones a la materia orgánica tipo C4 a la carga agregada desde los tributarios y desde la depuradora de Pinilla. Cabe destacar que la materia orgánica tipo C4 tendrá un origen casi exclusivo ligado a las actividades humanas (urbanas o asociadas a la ganadería).

Los escenarios definidos se detallan en la tabla 46.

TABLA 46. ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA DQO

Escenario	Definición	Reducción de carga en % respecto al total	
		Tributarios	Depuradora
Escenario DQ01	Idealizado	100	100
Escenario DQ02	Actuación decidida	50	70
Escenario DQ03	Actuación decidida realista	20	70
Escenario DQ04	Realista	0	100

Además de los escenarios equivalentes para otros compuestos, se ha incluido aquí un escenario (DQ03) que representa una actuación decidida más realista que la propuesta en DQ02. Hemos incluido este escenario ya que en nuestra opinión el control de la DQO a escala de cuenca puede ser un objetivo mucho más complejo que el control de otro tipo de nutrientes, con lo que el 50 por ciento definido en DQ02 podría no ser realizable.

Balance de masas para el oxígeno hipolimnético

Los resultados para cada escenario se pueden consultar en la tabla 47, comparados con el balance original.

Se puede observar que las actuaciones en la cuenca tienen siempre un efecto muy significativo, mientras que el control exclusivo de la materia orgánica en la depuradora de Pinilla no tendría un efecto aparente en la concentración de oxígeno hipolimnético. Incluso decrementos modestos de la cantidad de materia orgánica de tipo C4 (20%, DQO3) resulta en mejoras muy evidentes en la concentración final de oxígeno hipolimnético. Parece difícil, de todas formas, llegar al umbral de 2,5 mg L⁻¹, señalado anteriormente, contemplando reducciones modestas de la cantidad de materiales proteicos procedentes de la cuenca, con lo que los procesos de carga interna desde los sedimentos podrían continuar siendo significativos durante los meses de verano.

TABLA 47. RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA DQO

Periodo	Consumo aparente de O ₂	DQO efectiva TOTAL	DQO efectiva (depuradora y debida a NH ₄ ⁺)	DQO efectiva (tributarios y debida a NH ₄ ⁺)	O ₂ final (mg L ⁻¹)	% mejora respecto al O ₂ final	Mejora respecto al O ₂ final (mg L ⁻¹)
BALANCE ORIGINAL							
1	47,5	12,8	3,5 (3,1)	9,3 (0,2)	2,1	-	-
2	189,7	103,2	4,2 (4,0)	99,0 (12,8)	1,0	-	-
DQO1							
1	42,5	7,8	3,1 (3,1)	4,7 (0,2)	3,0	45	0,94
2	150,3	63,8	4,1 (4,0)	59,7 (12,8)	7,1	639	6,13
DQO2							
1	44,9	10,2	3,2 (3,1)	7,0 (0,2)	2,6	23	0,48
2	170,0	83,5	4,2 (4,0)	79,3 (12,8)	4,0	320	3,07
DQO3							
1	46,5	11,9	0,43 (0,0)	8,4 (0,2)	2,3	8	0,18
2	181,9	95,4	0,19 (0,0)	91,1 (12,8)	2,2	127	1,22
DQO4							
1	47,1	12,5	3,1 (3,1)	9,3 (0,23)	2,2	3	0,07
2	189,6	103,1	4,1 (4,0)	99,0 (12,8)	1,0	2	0,02

6.1.2.3. Escenarios para la combinación DQO + NH₄⁺

Obviamente, los escenarios de control de la DQO y del amonio pueden combinarse en escenarios mixtos para evaluar su impacto en la concentración de oxígeno hipolimnético.

Los escenarios se han definido teniendo en cuenta reducciones de la DQO por materia orgánica desde los tributarios (reducciones de DQO por este origen han demostrado ser insignificantes desde la depuradora de Pinilla) y reducciones de amonio desde el uso urbano y la depuradora de Pinilla. Para estos cálculos se han seguido los mismos métodos y criterios ya señalados tanto para la DQO como para el amonio.

Los escenarios definidos se detallan en la tabla 48.

TABLA 48. RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA COMBINACIÓN DQO + NH₄⁺

Escenario	Definición	Reducción de carga en % respecto al total		
		DQO tributarios	NH ₄ ⁺ depuradora	NH ₄ ⁺ Uso Urbano
Escenario COM1	Actuación extrema	30	70	50
Escenario COM2	Actuación decidida	10	70	50
Escenario COM3	Actuación realista	10	90	0

Se incluye un escenario que se puede considerar realista, y otro que se puede considerar extremo, ya que incluye una reducción del 30 por ciento de la carga orgánica lábil desde los tributarios, lo que puede resultar de difícil aplicación.

Balance de masas para el oxígeno hipolimnético

Los resultados para cada escenario se detallan en la tabla 49, comparados con el balance original.

Se puede observar que la combinación en COM3 y COM2 es más eficiente que la anterior DQO3, que incluía un descenso del 20 por ciento de la carga de DQO lábil desde los tributarios, frente a un 10 por ciento, más el control del amonio en estos escenarios.

Se confirma así que el control combinado del amonio y de la DQO lábil puede ser una buena estrategia para mitigar el consumo de oxígeno en el hipolimnion del embalse de Pinilla. Así mismo, se aprecia que incrementar de forma significativa el porcentaje de reducción de DQO desde la cuenca (COM1) supone una mejora muy notable, lo que debería tenerse en cuenta de cara a posibles medidas de mitigación.

TABLA 49. RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA COMBINACIÓN DQO + NH₄⁺

Periodo	Consumo aparente de O ₂	DQO efectiva TOTAL	DQO efectiva (depuradora y debida a NH ₄ ⁺)	DQO efectiva (tributarios y debida a NH ₄ ⁺)	O ₂ final (mg L ⁻¹)	% mejora respecto al O ₂ final	Mejora respecto al O ₂ final (mg L ⁻¹)
BALANCE ORIGINAL							
1	47,5	12,8	3,5 (3,1)	9,3 (0,2)	2,1	-	-
2	189,7	103,2	4,2 (4,0)	99,0 (12,8)	1,0	-	-
COM1							
1	43,9	9,2	1,3 (0,9)	7,9 (0,2)	2,8	32	0,68
2	173,3	86,8	1,4 (1,2)	85,4 (11,0)	3,5	266	2,56
COM2							
1	44,8	10,1	1,3 (0,9)	8,8 (0,2)	2,6	24	0,50
2	181,2	94,7	1,4 (1,2)	93,3 (11,0)	2,3	139	1,33
COM3							
1	44,2	9,6	0,7 (0,3)	8,9 (0,2)	2,7	29	0,60
2	182,1	95,7	0,6 (0,4)	95,0 (12,8)	2,1	123	1,18

A continuación se resumen todos los escenarios presentados hasta ahora para el control del consumo de oxígeno en el embalse en las figuras 240 y 241 y la tabla 50, utilizando la concentración de oxígeno final como la variable maestra para la comparación entre alternativas y la situación observada. Se ha señalado la concentración 2,5 mg L⁻¹ como umbral a partir del cual se podrían inhibir los procesos de carga interna desde el sedimento. Se comprueba que los cambios son más acusados en el segundo periodo. Esto es normal, ya que el efecto de las cargas externas era mucho más evidente en este periodo que en el primero, cuando el consumo estaba dominado por la demanda desde el sedimento. Durante periodos de altos caudales se aprecia que las mejores opciones pasan por el control de los aportes de DQO desde la cuenca, aunque la gestión de los aportes de amonio puede ayudar si se realizan actuaciones contundentes al respecto.

FIGURA 240. RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS PROPUESTOS SOBRE EL CONSUMO DE OXÍGENO DURANTE EL PERÍODO 1

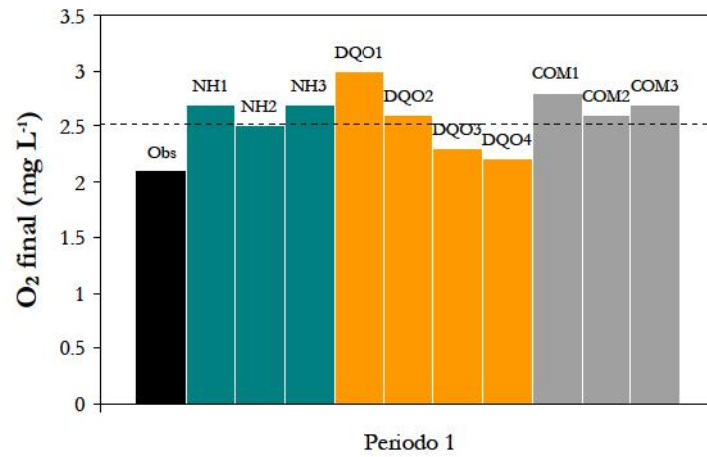


FIGURA 241. RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS PROPUESTOS SOBRE EL CONSUMO DE OXÍGENO DURANTE EL PERÍODO 2

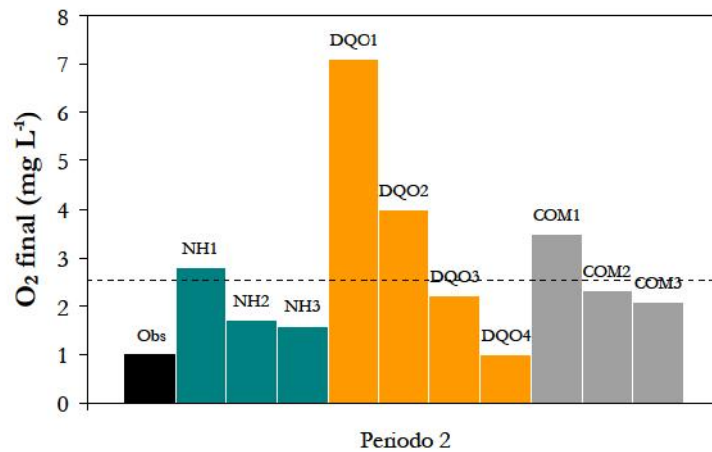


TABLA 50. RESUMEN DE LOS RESULTADOS PARA EL CONJUNTO DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS

Periodo	Consumo aparente de O ₂	DQO efectiva TOTAL	DQO efectiva (depuradora y debida a NH ₄ ⁺)	DQO efectiva (tributarios y debida a NH ₄ ⁺)	O ₂ final (mg L ⁻¹)	% mejora respecto al O ₂ final	Mejora respecto al O ₂ final (mg L ⁻¹)
BALANCE ORIGINAL							
1	47,5	12,8	3,5 (3,1)	9,3 (0,2)	2,1	-	-
2	189,7	103,2	4,2 (4,0)	99,0 (12,8)	1,0	-	-
NH1							
1	44,2	9,6	0,43 (0,0)	9,1 (0,04)	2,7	29	0,61
2	177,9	91,4	0,20 (0,0)	91,2 (5,1)	2,8	191	1,84
NH2							
1	45,3	10,6	1,34 (0,9)	9,27 (0,16)	2,5	20	0,41
2	185,1	98,6	1,41 (1,2)	97,2 (11,0)	1,7	75	0,72
NH3							
1	44,4	9,8	0,43 (0,0)	9,3 (0,23)	2,7	27	0,57
2	185,7	99,2	0,19 (0,0)	99,0 (12,8)	1,6	66	0,63
DQ01							
1	42,5	7,8	3,1 (3,1)	4,7 (0,2)	3,0	45	0,94
2	150,3	63,8	4,1 (4,0)	59,7 (12,8)	7,1	639	6,13
DQ02							
1	44,9	10,2	3,2 (3,1)	7,0 (0,2)	2,6	23	0,48
2	170,0	83,5	4,2 (4,0)	79,3 (12,8)	4,0	320	3,07
DQ03							
1	46,5	11,9	0,43 (0,0)	8,4 (0,2)	2,3	8	0,18
2	181,9	95,4	0,19 (0,0)	91,1 (12,8)	2,2	127	1,22
DQ04							
1	47,1	12,5	3,1 (3,1)	9,3 (0,23)	2,2	3	0,07
2	189,6	103,1	4,1 (4,0)	99,0 (12,8)	1,0	2	0,02
COM1							
1	43,9	9,2	1,3 (0,9)	7,9 (0,2)	2,8	32	0,68
2	173,3	86,8	1,4 (1,2)	85,4 (11,0)	3,5	266	2,56
COM2							
1	44,8	10,1	1,3 (0,9)	8,8 (0,2)	2,6	24	0,50
2	181,2	94,7	1,4 (1,2)	93,3 (11,0)	2,3	139	1,33
COM3							
1	44,2	9,6	0,7 (0,3)	8,9 (0,2)	2,7	29	0,60
2	182,1	95,7	0,6 (0,4)	95,0 (12,8)	2,1	123	1,18

6.2. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE DE PINILLA

La amenaza del cambio climático es un hecho científicamente confirmado para amplias regiones del planeta. En especial, el área Mediterránea sufrirá un descenso de la escurrentía en los ríos que puede alcanzar entre el 20 y el 40 por ciento, según las zonas y el horizonte temporal. Esto repercutirá negativamente en la calidad de las aguas recogidas en los embalses, tal y como nuestro equipo de trabajo ha demostrado en un trabajo reciente (Marcé et al., 2010).

Pese a que el objetivo de este estudio no es el impacto del cambio climático en el embalse de Pinilla, dada la trascendencia de este tema, se incluyó este punto en el programa de mejoras al pliego técnico. Se pretende estudiar primero cuál es la predicción más robusta en la literatura para luego estimar cuál será el efecto de la modificación de caudales en la calidad del agua del embalse, utilizando para ello las diferentes ecuaciones empíricas desarrolladas para este estudio.

6.2.1. Predicciones sobre cambio climático para la cuenca del Tajo

Recientemente, la Dirección General de Aguas encomendó al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Hidráulicas (CEDEX), un estudio sobre la *“Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural”*. Este estudio ha abarcado toda la Península Ibérica y los archipiélagos, y constituirá un documento de referencia para la gestión de los recursos hídricos durante los próximos años.

El estudio es muy completo, entre los muchos temas abordados está el del impacto climático sobre los recursos hídricos. Recogemos aquí los resultados más relevantes para la Península y la cuenca del Tajo en particular, con el fin de obtener la mejor estimación de la modificación de caudales esperados durante los próximos decenios. Por consideraciones puramente prácticas, hemos decidido centrar este análisis en el periodo 2011-2040, ya que consideramos que es el más interesante desde el punto de vista de la gestión de los recursos para Canal de Isabel II.

La Figura 242 muestra las predicciones de la variación de escurrentía a 2011-2040 para la Península utilizando diversas combinaciones de modelos de circulación general y métodos de reescalado, considerando dos escenarios socioeconómicos (que se corresponden groseramente con un escenario de aumento de emisiones (A2); y uno de estabilización (B2)).

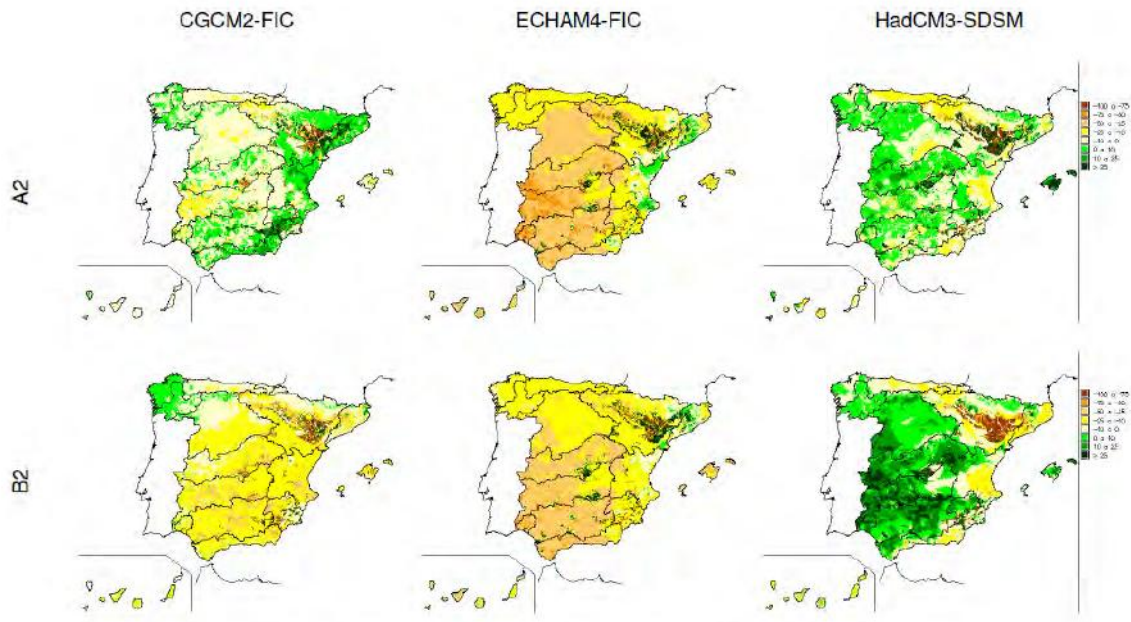
Se puede observar que los resultados de los diferentes modelos muestran una variabilidad considerable, por lo que gran parte de los resultados que se incluirán en esta sección son de hecho medias para los tres modelos que aquí se detallan.

Para la región que nos interesa en la cuenca del Tajo, se observa bastante variabilidad en los modelos, aunque en general hay una previsión de descenso moderado de los caudales. Esto es mucho más evidente si se hace una media de las observaciones con los tres modelos (Figura 243).

Esto parecería indicar que para la cuenca del Lozoya podría esperarse una disminución de la escurrentía de alrededor del 10 por cien para el periodo 2011-2040; así está expresado para la cuenca del Tajo en el informe del CEDEX, al que asigna un valor probable de disminución del caudal del 8 por ciento para el periodo 2011-2040. El detalle de las predicciones para la cuenca del Tajo y los diferentes horizontes temporales puede consultarse en la Figura 244.

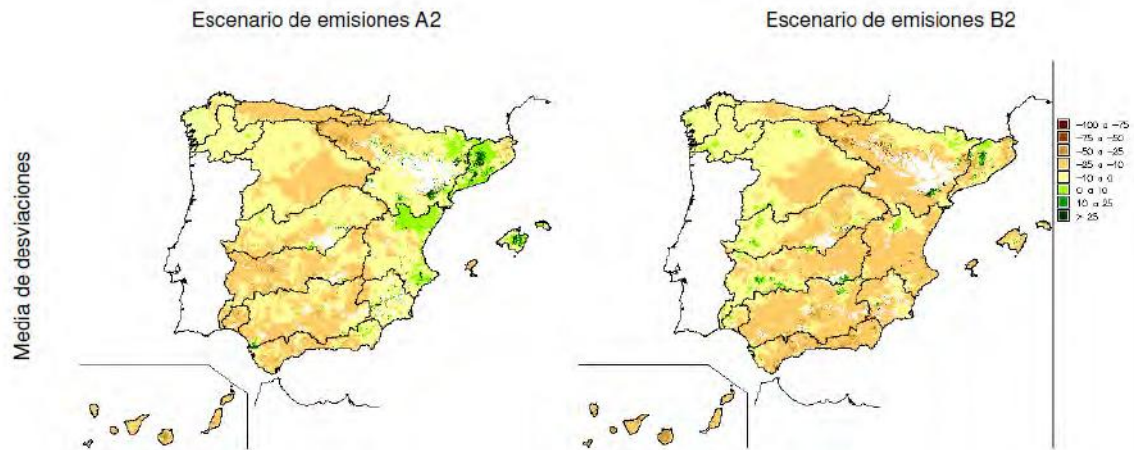
Por descontado, la disminución en la escurrentía impacta directamente en la cantidad de agua evacuada por los ríos, como se muestra en la Figura 245.

FIGURA 242. RESULTADOS DE VARIACIÓN DE ESCORRENTÍA PARA TRES MODELOS DE CIRCULACIÓN DIFERENTES



En amarillo/marrón, disminuciones de escorrentía. En verdes, aumentos de escorrentía (fuente: CEDEX)

FIGURA 243. MEDIA DE LOS RESULTADOS DE VARIACIÓN DE ESCORRENTÍA PARA LOS TRES MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL MOSTRADOS EN LA FIGURA ANTERIOR



En amarillo/marrón, disminuciones de escorrentía. En verdes, aumentos de escorrentía (fuente: CEDEX)

6.2.2. Predicciones sobre cambio climático para la cuenca del Lozoya: efectos locales y dimensión de gestión

Los estudios sobre cambio climático suelen referir los cambios simulados con los modelos de circulación global, para un periodo concreto de referencia.

En el caso del cambio climático este periodo suele ser 1961-1990. Aunque esto puede resultar satisfactorio desde un punto de vista del análisis climático, puede confundir en el caso de que estemos interesados en la gestión del recurso, ya que las experiencias de gestión más cercanas se corresponden con las dos últimas décadas, ausentes en el periodo de control climático. Esto no sería muy grave si los caudales durante las dos últimas décadas se hubieran comportado de forma estacionaria, y con valores promedios parecidos a los del periodo de control climático. Esto, como sabe cualquier gestor de recursos acuáticos en España, no ha sido así.

De hecho, el periodo entre 1980 y la actualidad se ha caracterizado por una marcada tendencia negativa en los caudales circulantes, lo que ha provocado que los promedios sean significativamente menores que en el periodo de control climático (1961-1990). Esto hace que todas las conclusiones del apartado anterior respecto al efecto del clima sólo apliquen si las referimos al periodo de control climático, pero no respecto a las dos últimas décadas.

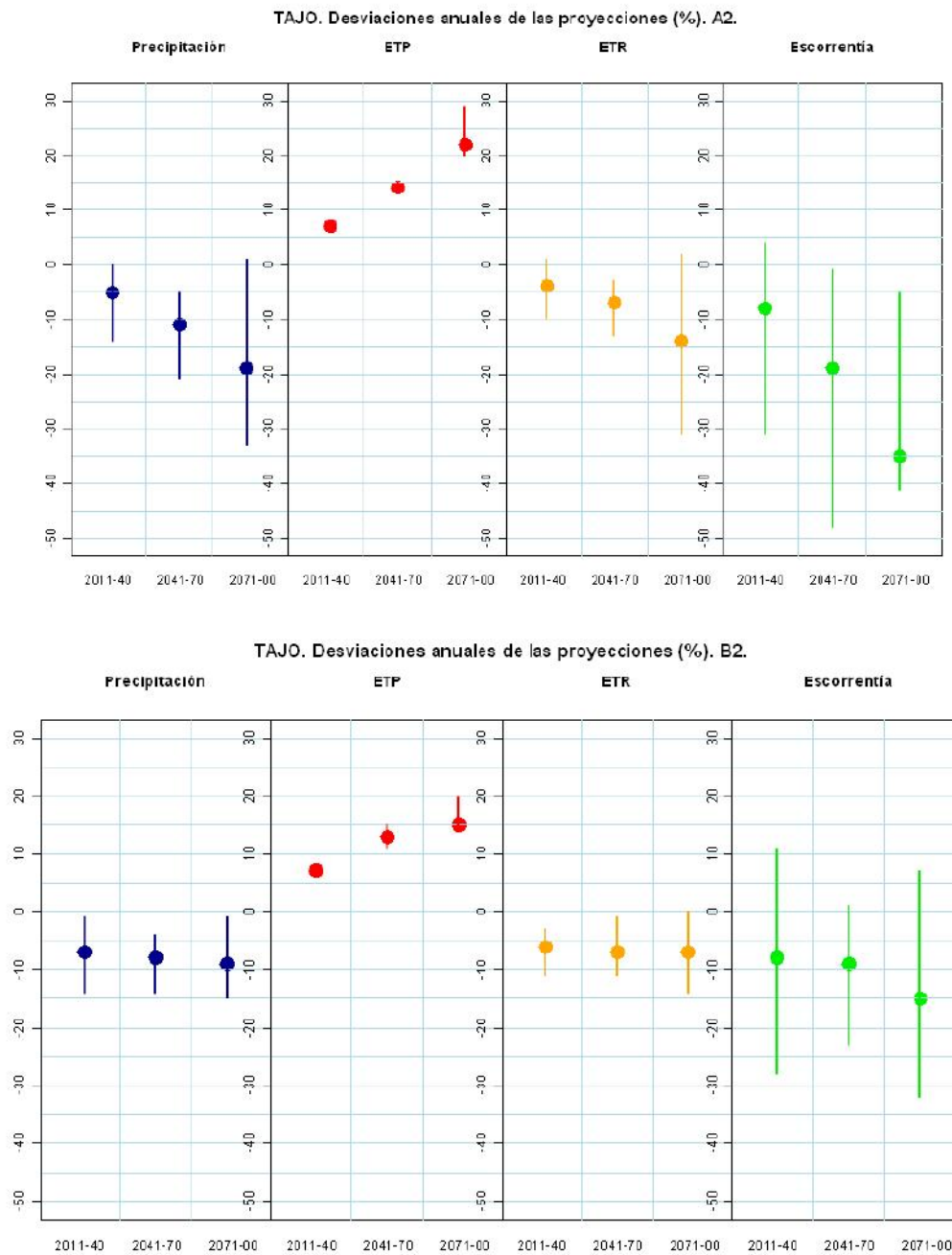
Afortunadamente, el estudio del CEDEX ha tenido en cuenta esto, detallando los resultados de las simulaciones climáticas respecto a periodos de control alternativos al climático. Siguiendo las directrices del Reglamento de Planificación Hidrológica (Real Decreto 907/2007) se dan en el estudio los resultados de las simulaciones, utilizando como periodo de control el comprendido entre los años 1980 y 2005. Este es el periodo de referencia idóneo cuando el análisis se efectúa en la dimensión de la gestión del recurso, ya que da una idea fidedigna de los cambios respecto a la situación en la que las normas de gestión vigentes se han aplicado.

Para el periodo de control 1980-2005, el efecto del cambio climático sobre la escurrentía en la cuenca del Tajo para los dos escenarios de emisiones se precisa en las tablas 51 y 52 con detalle estacional.

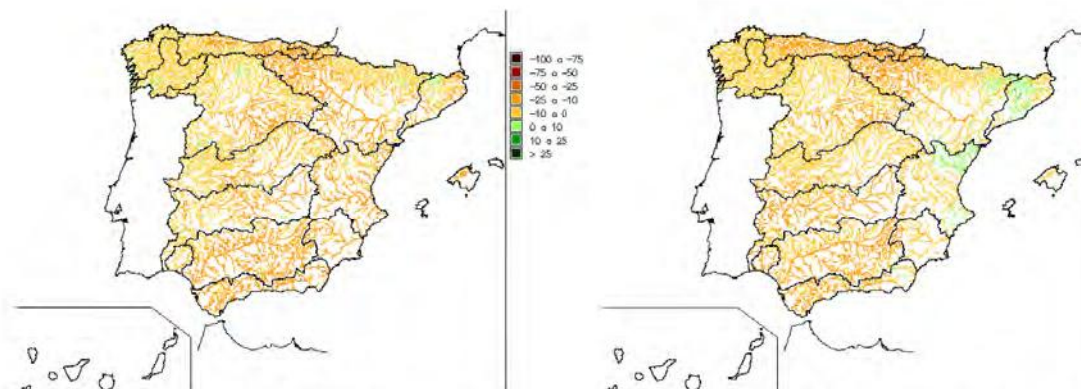
Se observa que la variación de escurrentía es muy diferente entre estaciones, con marcadas disminuciones en verano y otoño, y aumentos también marcados en invierno y primavera. El resultado agregado anual es prácticamente idéntico en los dos escenarios, y marca un **AUMENTO** de la escurrentía anual del 13 por ciento. Esto supone un escenario muy diferente del que se obtiene con el periodo de control climático, y se debe al hecho de que las dos últimas décadas han sido muy secas en la Península. Esto hace que, aunque para el periodo de control 1961-1990 el efecto del clima vaya a ser de un marcado descenso, cuando se incluyen las dos últimas décadas el efecto neto sea de incremento de caudal.

Por lo tanto, en lo que respecta a este estudio, hemos analizado los efectos potenciales del cambio climático en el horizonte 2011-2040, utilizando el periodo de control 1980-2005. Esto nos permite utilizar la base de datos de las aportaciones a Pinilla de Canal de Isabel II, para definir un escenario de control al que aplicarle las modificaciones estacionales arriba señaladas. Debido a que para este horizonte temporal las simulaciones climáticas en A2 y B2 son prácticamente idénticas, se ha decidido aplicar el promedio de los dos escenarios a la hora de generar las series con cambio climático. Esto da un resultado de (+13 %) de escurrentía en primavera; (-13 %) en verano; (-9 %) en otoño, y (+40,5 %) de escurrentía en invierno.

FIGURA 244. PREDICIONES CLIMÁTICAS PARA LA CUENCA DEL TAJO, PARA LOS TRES HORIZONTES TEMPORALES CONSIDERADOS EN EL TRABAJO DEL CEDEX



Se incluyen predicciones para la Precipitación; evapotranspiración potencial (ETP); evapotranspiración real (ETR); y escorrentía, según los escenarios de emisiones A2 y B2. Las desviaciones se refieren a las diferencias en las predicciones de los diferentes modelos climáticos utilizados (fuente: CEDEX)

FIGURA 245. VARIACIÓN PORCENTUAL DEL CAUDAL DE LOS RÍOS PENINSULARES EN EL HORIZONTE 2011-2040 PARA EL ESCENARIO B2 (IZQUIERDA) Y A2 (DERECHA)

El resultado es el promedio de los diferentes modelos climáticos utilizados (fuente: CEDEX)

TABLA 51. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA ESCORRENTÍA EN LA CUENCA DEL TAJO, ESCENARIO A2

Escenario A2	% reducción de escorrentía			
	CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadCM3-SDSM	Media
Primavera	21	21	-5	13
Verano	7	-50	9	-12
Otoño	27	-50	-3	-9
Invierno	21	17	67	35

TABLA 52. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA ESCORRENTÍA EN LA CUENCA DEL TAJO, ESCENARIO B2

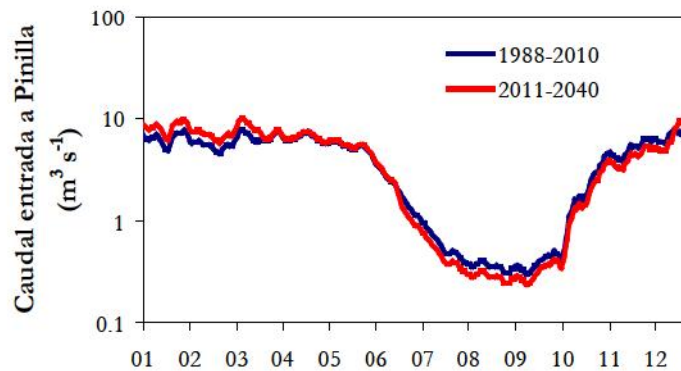
Escenario B2	% reducción de escorrentía			
	CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadCM3-SDSM	Media
Primavera	15	13	10	13
Verano	-2	-56	17	-14
Otoño	8	-51	17	-9
Invierno	12	48	79	46

6.2.3. Afectaciones a la calidad del agua

Lo primero que se elaboró para la evaluación del impacto del cambio climático en el embalse fue una serie de caudales modificada según los criterios detallados arriba. Para ello se construyó primero una serie diaria (año tipo) calculando la media del caudal para cada día del año considerando el periodo 1988-2010. A esta media se le aplicó posteriormente un promedio móvil de cinco días, para atenuar el ruido, y se construyó una serie afectada por cambio climático según los criterios de variación porcentual detallados anteriormente, que coinciden con un aumento anual del 13 por ciento.

Aunque el periodo de control no coincide exactamente con el empleado por el CEDEX, sí que tienen en común que incluyen los eventos de sequías de las décadas de 1990 y 2000, con lo que las medias son muy parecidas. De este modo también utilizamos la serie de gestión que utiliza Canal de Isabel II, lo que redundará en la aplicabilidad de los resultados. El resultado se puede visualizar en la Figura 246.

FIGURA 246. CAUDALES DE ENTRADA A PINILLA PARA UN AÑO TIPO DEL PERIODO 1989-2010 Y DEL PERIODO 2011-2040



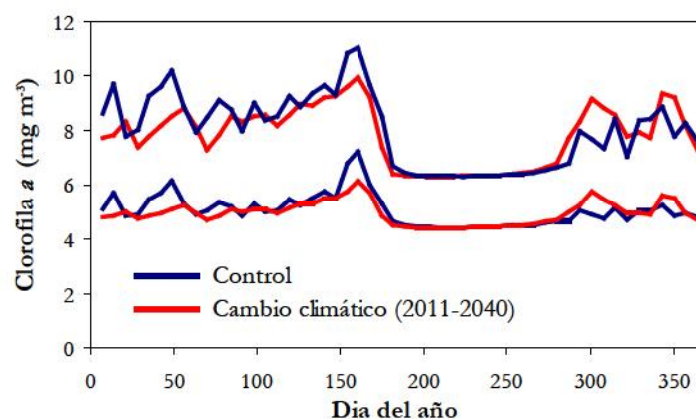
Se observa un aumento de caudal respecto al periodo de control durante invierno y primavera, y un descenso durante el verano y el otoño. Estas variaciones de caudal se han utilizado para generar una serie de variación de volumen en el embalse aplicando los mismos criterios de desembalse actuales, con desembalses mínimos de $0,11 \text{ hm}^3 \text{ día}^{-1}$ durante el verano, y recuperación y mantenimiento de volúmenes durante el resto del año. Esto nos ha permitido calcular cuál sería el efecto del cambio climático sobre el tiempo de residencia del agua en el embalse. Por lo que respecta a la escala anual, debido al carácter regulador del embalse y la escasa variación de caudales, se detecta un efecto muy pequeño en el tiempo de residencia teórico que pasa de 0,24 a 0,22 años, lo que debería tener un efecto insignificante en la calidad del agua y el riesgo de eutrofia si no cambiase ninguna otra variable.

Respecto a los tres periodos definidos en nuestro estudio, el tiempo de residencia habría subido ligeramente en el primero (de 3,03 a 3,14 años), y bajado en los otros dos (de 0,58 a 0,53 y de 0,50 a 0,45 años, respectivamente).

Estas variaciones del tiempo de residencia son muy modestas, y aplicadas a los modelos de clorofila construidos para este estudio no significan cambios mayores del 5 por ciento en ningún caso, con lo que no se consideran significativos. Aceptando una variación concomitante de la concentración de nitrógeno total desde los tributarios los resultados tampoco varían mucho más.

Calculando una relación entre el caudal de entrada y la concentración promedio de NT por periodos ($r=-0,99$; $n=3$), y aplicándola a la variación de caudal observada, el efecto combinado de la variación de concentración de NT y la variación del tiempo de residencia da unas desviaciones de la concentración de clorofila nunca mayores al 6 por ciento, utilizando el modelo de NT y clorofila con tres periodos.

También hemos adaptado los tiempos de residencia y la concentración de NT al cambio climático para ser utilizadas a escala cuasi-semanal en el modelo de red neuronal. Para ello, se han calculado concentraciones de NT sintéticas, con ayuda de las relaciones existentes con el caudal descritas por LOADEST. Con ellas se han construido series de NT semanales, para el año tipo control, y para el año tipo 2011-2040. Los resultados no arrojan cambios espectaculares (Figura 247), y están en consonancia con los anteriores. Aunque parece intuirse un ligero descenso durante el invierno y un ligero aumento durante el verano, no se puede sostener un cambio significativo.

FIGURA 247. RESULTADOS DEL MODELO NEURONAL PARA CLOROFILA, PARA EL ESCENARIO DE CONTROL (1988-2010) Y PARA EL HORIZONTE 2011-2040

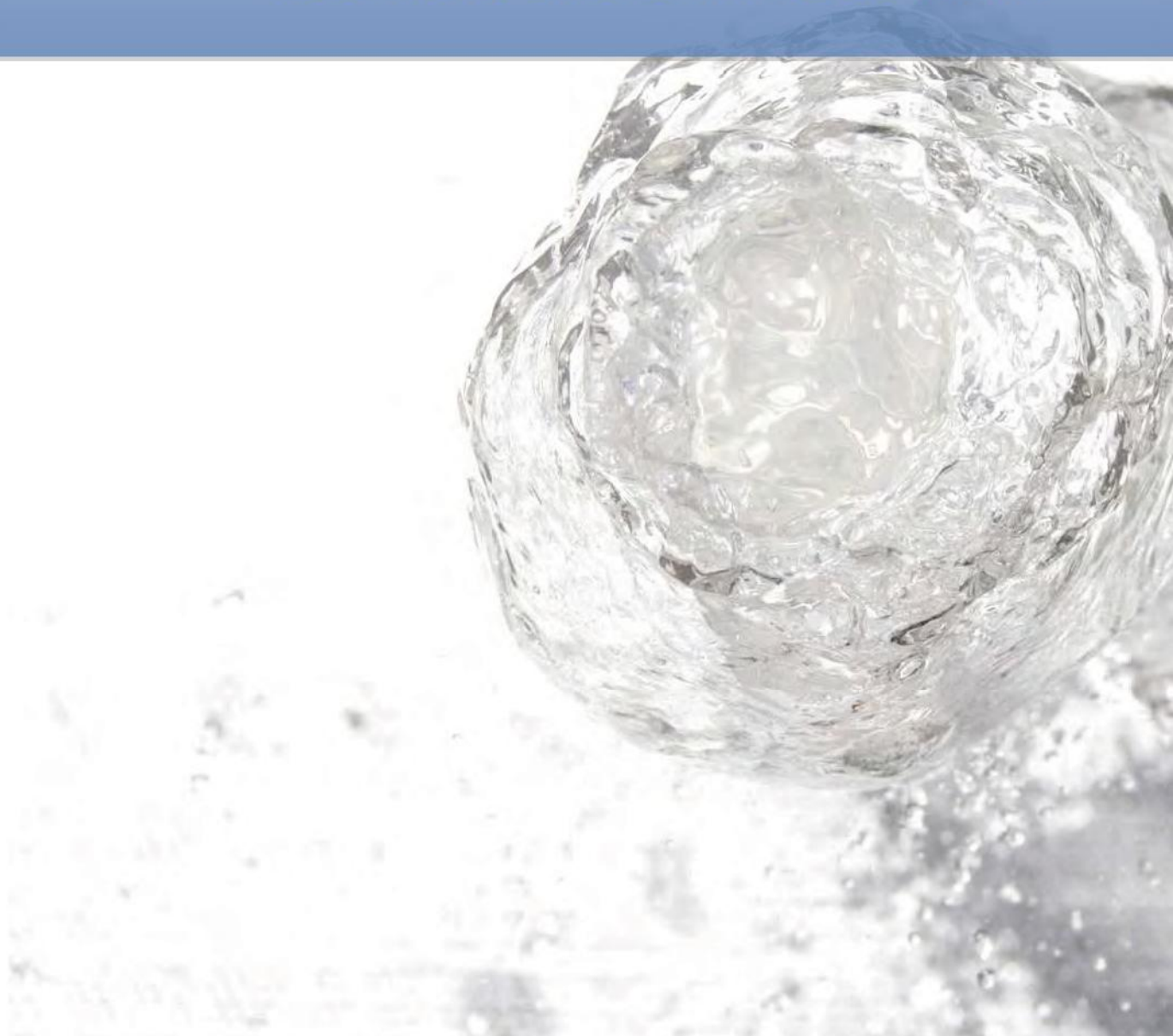
Las líneas de un mismo color delimitan la evolvente de incertidumbre al 95% de los resultados del modelo

Finalmente, respecto al desarrollo de capas anóxicas no se esperan cambios significativos por lo moderado del cambio en las aportaciones. Sí se pueden producir pequeñas variaciones en los siguientes sentidos:

- El control de la anoxia en periodos secos es en la actualidad por demanda sedimentaria. En el periodo 2011-2040 este control será un poco más acentuado por la bajada de caudales en temporadas secas, lo que en términos generales daría una variación mínima de la extensión de la anoxia.
- Durante periodos húmedos, el control está más equilibrado entre la demanda sedimentaria y los aportes externos. Aquí se puede producir un pequeño repunte en la demanda por aportes externos, debido a la mayor carga externa.

En términos globales, si durante el periodo 2011-2040 los aportes en primavera crecen un 13 por ciento, ello significaría una tendencia al aumento de entradas justo antes del periodo de estratificación. Esto podría ayudar a que antes de las bajadas fuertes de oxígeno el sistema esté en un estado de oxidación superior, con lo que en principio, habría una reserva mayor para el periodo estival. Este efecto previo de reserva primaveral es común, y se ha observado en otros embalses (en Sau hay una base de datos muy extensa que así lo verifica). Si las variaciones en el periodo 2011-2040 van en el sentido de las predicciones, el efecto del cambio climático, aparte de ser pequeño, no debería necesariamente empeorar la situación, sino al contrario.

7. Conclusiones del estudio y actuaciones recomendadas para controlar el proceso de eutrofia en el embalse de Pinilla



7.1. CONCLUSIONES

A continuación se exponen las conclusiones formuladas para este estudio.

1. Los principales focos de nutrientes y materia orgánica en la cuenca del embalse de Pinilla son la población de Rascafría y sus núcleos urbanos asociados, la depuradora de Pinilla, el núcleo urbano de Lozoya, el tramo inmediatamente anterior al embalse de Pinilla, la estación de Valdesquí y el arroyo Umbría.
2. En los tramos del río Lozoya, aguas abajo del área recreativa de La Isla, hasta la conjunción con el arroyo Umbría, y aguas bajo de la urbanización de Los Grifos, hasta la conjunción con el arroyo de Santa Ana, se dan procesos de autodepuración conspicuos.
3. Pese a que no hay información oficial sobre vertidos incontrolados en áreas urbanas, los usos de suelo urbano están asociados a importantes cargas de materiales, particularmente **amonio, DQO y nitrógeno, y fósforo total**.
4. El análisis espectroscópico y de degradabilidad de la materia orgánica disuelta ha revelado la presencia de material orgánico muy lábil, con toda probabilidad de origen humano, en muchos puntos de la cuenca, pero especialmente en los siguientes puntos:
 - Aguas abajo de Valdesquí
 - Aguas abajo de las Presillas
 - Aguas abajo de Rascafría
 - En el efluente de la depuradora de Pinilla
5. Las entradas desde el río Lozoya dominan los aportes al embalse para la mayoría de materiales, aunque la depuradora es el principal aporte de **amonio y hierro**, en especial durante periodos de bajo caudal. El arroyo del Palomar, en el núcleo de Lozoya, tiene un papel menos importante.
6. El embalse actúa como exportador neto de **fósforo y manganeso**, lo que confirma que durante el verano se dan procesos de carga interna desde el sedimento.
7. El embalse de Pinilla puede calificarse como **moderadamente eutrófico** según las concentraciones de clorofila que presenta, con un riesgo real de sufrir un empeoramiento repentino si las cargas de fósforo aumentasen de forma apreciable. Desde otro punto de vista, se puede afirmar que actuaciones de mitigación podrían suponer mejoras muy visibles.
8. Las poblaciones de algas parecen estar controladas a escala estacional por las entradas de materiales desde el río, particularmente de **nitrógeno total**. Las poblaciones invernales están dominadas por algas mixotróficas (criptófitos) que responden a caudales relativamente altos. Las poblaciones estivales son dominadas por cianobacterias, mientras que en primavera y otoño la situación es más variable, con dominancia de diatomeas, criptófitos, o una comunidad diversa según las condiciones ambientales, particularmente el caudal.
9. Aunque el desarrollo de capas anóxicas en el embalse es moderado, se dan fenómenos de redisolución de metales y nutrientes a partir de concentraciones de oxígeno medias hipolimnéticas de $2,5 \text{ mg L}^{-1}$. Este fenómeno es particularmente acusado para el **manganeso**.
10. El balance de masa de consumo de oxígeno en el hipolimnion da un papel muy importante a la demanda sedimentaria, en especial en periodos de caudales bajos. La **DQO** proveniente de la cuenca domina el balance de oxígeno en momentos de caudales altos. El efecto de la depuradora siempre es menor al 10 por cien del consumo total, aunque es más importante si sólo se tienen en cuenta los aportes de DQO externos.

Conclusiones del estudio y actuaciones recomendadas para controlar el proceso de eutrofia en el embalse de Pinilla

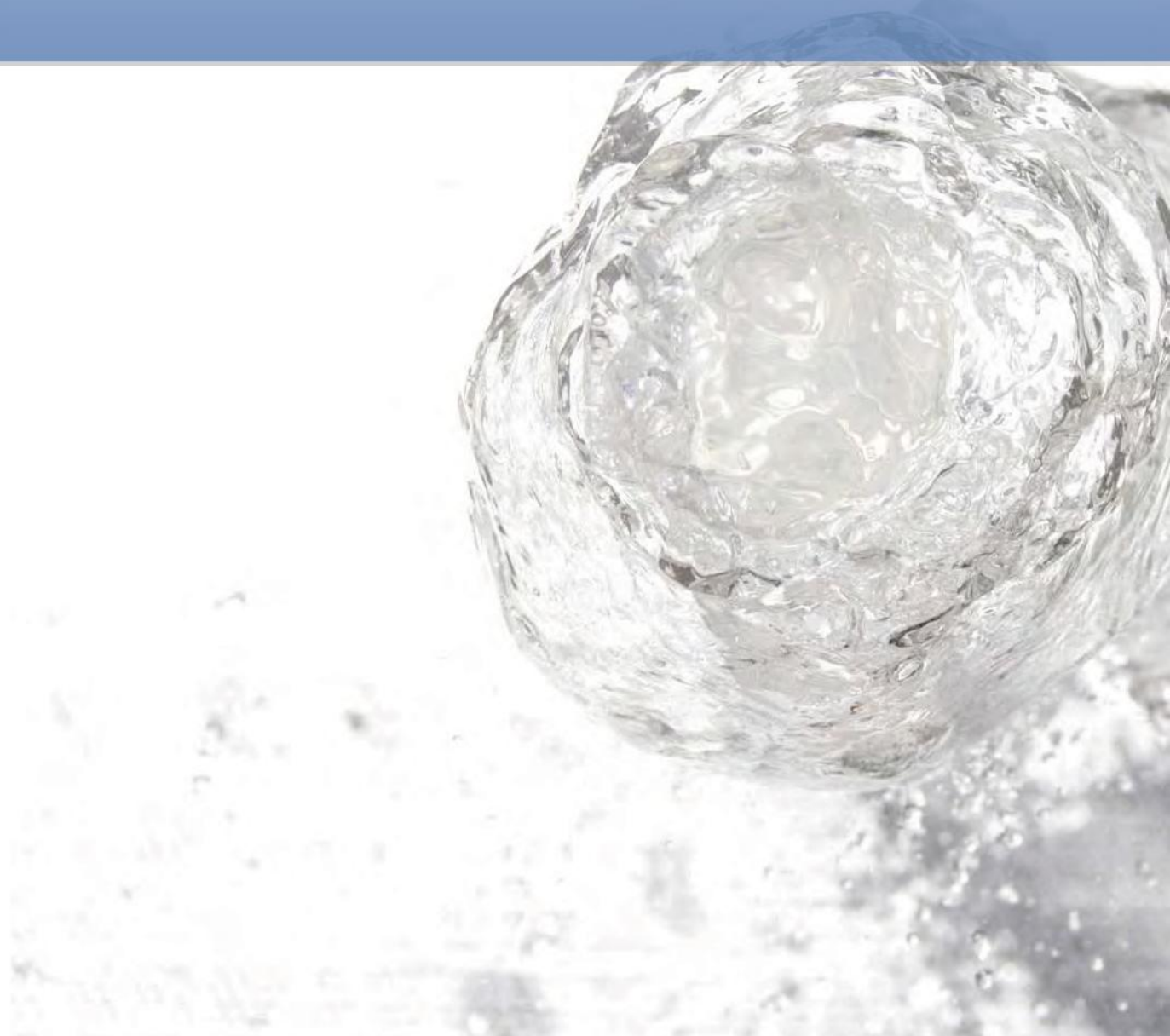
11. El control de la carga de **fósforo total** sólo tiene un efecto evidente en la concentración de clorofila y el riesgo de eutrofización en el embalse, si se aplican medidas a escala de cuenca sobre los usos urbanos y la ganadería. Actuaciones limitadas a la depuradora de Pinilla tendrían resultados apreciables, pero pequeños.
12. El control de las cargas de **amonio** desde la depuradora puede tener un efecto importante en la evolución estacional de la clorofila en el embalse. Si las actuaciones incluyen también los usos urbanos en la cuenca las mejoras serían más evidentes en situaciones de caudales altos durante el invierno.
13. En periodos primavera-verano secos, el control de las cargas de **amonio** desde la depuradora puede evitar la generación de capas anóxicas y limitar la redisolución de sustancias desde el sedimento.
14. En periodos primavera-verano húmedos, es necesario controlar la carga de **DQO lábil** desde la cuenca para evitar la generación de capas anóxicas. Esta mejora resulta más evidente si se combina con la limitación de las cargas de amonio desde los usos urbanos y la depuradora de Pinilla.
15. El **cambio climático** implicará un aumento anual de los caudales del 13 por ciento, durante el periodo 2011-2040, respecto al periodo 1980-2005. Los efectos sobre la calidad del agua serán mínimos, por lo que a corto plazo, el cambio climático no afectará de forma significativa posibles medidas de mitigación.

7.2. RECOMENDACIONES

Se formulan las siguientes recomendaciones para este estudio:

- A. Se recomienda establecer un punto de muestreo en la entrada principal al embalse de Pinilla (río Lozoya), en el seguimiento que lleva a cabo Canal de Isabel II. Esto es esencial para futuros estudios que complementen éste, o para evaluar futuras medidas de mitigación a escala de cuenca.
- B. Se recomienda tomar las medidas necesarias para la limitación severa de las cargas de amonio desde el efluente de la depuradora de Pinilla. Esto tendría un efecto apreciable, tanto en la concentración de clorofila en el embalse, como en la generación de capas anóxicas.
- C. Para una mitigación importante del proceso de eutrofización del embalse de Pinilla sería necesario actuar a nivel de la cuenca. Particularmente, sería muy importante conocer los detalles del ciclo del agua en los núcleos de Lozoya y, sobretodo, Rascafría y urbanizaciones cercanas a Pinilla para saber si hay vertidos no tratados, o limitaciones graves en las redes de alcantarillado o conexión con las depuradoras. El control de la DQO y del amonio debería ser una prioridad si existiesen estos vertidos y deficiencias.

8. Anexos



8.1. ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
1	CÁLCULO DE BALANCES, RESUMEN SISTEMA LOZOYA	14
2	CARGAS DE MATERIALES Y PERIODOS	15
3	MODELACIÓN SPARROW, ORIGEN DE LAS CARGAS AL EMBALSE DE PINILLA	16
4	MODELOS EMPÍRICOS DE CARGA-RESPUESTA PARA LA PREDICCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA	17
5	MODELOS DE RED NEURONAL PARA LA PREDICCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA	17
6	PAPEL DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LA GENERACIÓN DE CAPAS ANOXICAS	18
7	CARGA DE FÓSFORO, CLOROFILA Y RIESGO DE EUTROFIZACIÓN	19
8	MODELO ESTACIONAL	19
9	BALANCE DE OXÍGENO - PERIODO 1	20
10	BALANCE DE OXÍGENO - PERIODO 2	21
11	CUENCA DE LOS EMBALSES DEL SISTEMA LOZOYA	25
12	LOCALIZACIÓN DE LAS 16 ESTACIONES DE MUESTREO EN LA CUENCA DE PINILLA	29
13	DIFERENTES MOMENTOS DEL PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DEL CAUDAL, EN DOS TRAMOS DE CARACTERÍSTICAS CONTRASTADAS EN LA CUENCA DE PINILLA	32
14	RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE CAUDAL MEDIDOS EN CADA PUNTO Y LOS VALORES OBTENIDOS MEDIANTE EL DRAINAGE-AREA RATIO	33
15	SERIE DE CAUDAL CALCULADA PARA EL PUNTO 11, CON INDICACIÓN DE LOS TRES PERIODOS ADICIONALES AL PERIODO COMPLETO CONSIDERADOS PARA EL CÁLCULO DE CARGAS	36
16	COMPARATIVA ENTRE LOS RESULTADOS DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE NITRÓGENO TOTAL (NT), OBTENIDOS MEDIANTE ANFIS Y LOADEST EN LOS PUNTOS DE MUESTREO 1 A 15	37
17	COMPARATIVA ENTRE LOS RESULTADOS DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTUO (DOC), OBTENIDOS MEDIANTE ANFIS Y LOADEST EN LOS PUNTOS DE MUESTREO 1 A 15	38
18	COMPARATIVA ENTRE LOS RESULTADOS DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE SILICE (SiO ₂), OBTENIDOS MEDIANTE ANFIS Y LOADEST EN LOS PUNTOS DE MUESTREO 1 A 15	38
19	COMPARATIVA ENTRE LOS RESULTADOS DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE NITRATO (NO ₃), OBTENIDOS MEDIANTE ANFIS Y LOADEST EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MUESTREO SITUADOS EN LA CUENCA	39
20	COMPARATIVA ENTRE LOS RESULTADOS DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE DQO, OBTENIDOS MEDIANTE ANFIS Y LOADEST EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MUESTREO SITUADOS EN LA CUENCA	39
21	CARGA MEDIA DIARIA DE FÓSFORO TOTAL, PERIODO COMPLETO	40
22	CARGA TOTAL DE FOSFORO TOTAL, PERIODO COMPLETO	40
23	BALANCE DE CARGAS DE FÓSFORO TOTAL POR PUNTOS	41
24	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE FOSFORO TOTAL	41
25	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA TOTAL DE FÓSFORO TOTAL	42
26	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE FOSFORO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA A LO LARGO DEL PERIODO DE ESTUDIO	42
27	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE FÓSFORO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA A LO LARGO DEL PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	43
28	CARGA MEDIA DIARIA DE NITRÓGENO TOTAL. PERIODO COMPLETO	43
29	CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL. PERIODO COMPLETO	44
30	BALANCE DE NITRÓGENO TOTAL A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	44
31	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS MEDIAS DIARIAS DE NITRÓGENO TOTAL. CARGA MEDIA SEGÚN PERIODO	44
32	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE NITRÓGENO TOTAL	45

Anexos

33	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE NITRÓGENO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA A LO LARGO DEL PERIODO DE ESTUDIO	45
34	DISTRIBUCION DE LAS ENTRADAS DE NITROGENO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA A LO LARGO DEL PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	46
35	CARGA MEDIA DIARIA DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO	46
36	CARGA TOTAL DE NITROGENO TOTAL PARTICULADO	47
37	BALANCE DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	47
38	DISTRIBUCION ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE NITROGENO TOTAL PARTICULADO	47
39	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO	48
40	DISTRIBUCION DE LAS ENTRADAS DE NITROGENO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO	48
41	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE NITRÓGENO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA, PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	49
42	CARGAS MEDIAS DIARIAS DE CARBONO TOTAL PARTICULADO	49
43	CARGAS TOTALES DE CARBONO TOTAL PARTICULADO	50
44	BALANCE DE CARBONO TOTAL PARTICULADO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	50
45	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE CARBONO TOTAL PARTICULADO	50
46	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA TOTAL DE CARBONO TOTAL PARTICULADO	51
47	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE CARBONO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO	51
48	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE CARBONO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	52
49	CARGA MEDIA DIARIA DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO	52
50	CARGAS TOTALES DE CARBONO ORGANICO DISUELTO	53
51	BALANCE DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	53
52	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO	53
53	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO	54
54	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN EL EMBALSE DE PINILLA. PERIODO DE ESTUDIO	54
55	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN EL EMBALSE DE PINILLA. PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	55
56	CARGA MEDIA DIARIA DE AMONIO	56
57	CARGAS TOTALES DE AMONIO	56
58	BALANCE DE AMONIO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	56
59	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE AMONIO	57
60	DISTRIBUCION ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE AMONIO	57
61	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE AMONIO EN EL EMBALSE DE PINILLA. PERIODO DE ESTUDIO	58
62	DISTRIBUCION DE LAS ENTRADAS DE AMONIO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	58
63	CARGAS MEDIAS DE DQO	59
64	CARGAS TOTALES DE DQO	59
65	BALANCE DE DQO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	59
66	DISTRIBUCION ESTACIONAL DE LAS CARGAS MEDIAS DE DQO	60
67	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE DQO	60
68	DISTRIBUCION DE LAS ENTRADAS D DQO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO	61
69	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS D DQO EN EL EMBALSE DE PINILLA, PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	61
70	CARGA MEDIA DIARIA DE NITRATO	62

Anexos

71	CARGAS TOTALES DE NITRATO	62
72	BALANCE DE NITRATO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	63
73	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE NITRATO	63
74	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE NITRATO	63
75	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE NITRATO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO	64
76	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE NITRATO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	64
77	CARGA MEDIA DIARIA DE FOSFATO	65
78	CARGAS TOTALES DE FOSFATO	66
79	BALANCE DE FOSFATO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	66
80	DISTRIBUCION ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE FOSFATO	66
81	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE FOSFATO	67
82	DISTRIBUCION DE LAS ENTRADAS DE FOSFATO EN EL EMBALDES DE PINILLA DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO	67
83	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE FOSFATOS EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	68
84	CARGA MEDIA DIARIA DE HIERRO	68
85	CARGAS TOTALES DE HIERRO	69
86	BALANCE DE HIERRO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	69
87	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE HIERRO	69
88	DISTRIBUCION ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE HIERRO	70
89	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE HIERRO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO	70
90	DISTRIBUCION DE LAS ENTRADAS DE HIERRO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	71
91	CARGA MEDIA DIARIA DE MANGANESO	71
92	CARGAS TOTALES DE MANGANESO	72
93	BALANCE DE MANGANESO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	72
94	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DE MANGANESO	73
95	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE MANGANESO	73
96	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE MANGANESO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO	74
97	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE MANGANESO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	74
98	CARGA MEDIA DIARIA DE CLORURO	75
99	CARGAS TOTALES DE CLORURO	75
100	BALANCE DE CLORUROS A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	76
101	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE CLORUROS	76
102	DISTRIBUCION ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE CLORUROS	76
103	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE CLORURO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO	77
104	DISTRIBUCION DE LAS ENTRADAS DE CLORURO EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	78
105	CARGA MEDIA DIARIA DE SÍLICE	78
106	CARGAS TOTALES DE SÍLICE	79
107	BALANCE DE SILICATO A LO LARGO DEL CAUCE PRINCIPAL	79
108	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LA CARGA MEDIA DIARIA DE SÍLICE	79

Anexos

109	DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS CARGAS TOTALES DE SÍLICE	80
110	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE SÍLICE EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO	80
111	DISTRIBUCIÓN DE LAS ENTRADAS DE SÍLICE EN EL EMBALSE DE PINILLA DURANTE EL PERIODO 12/07/10 – 28/10/10	81
112	ESQUEMA DE LAS PRINCIPALES ZONAS DE APORTACION DE NUTRIENTES EN LA CUENCA DE PINILLA Y TRAMOS DONDE SE PRODUCE RETENCIÓN NETA DE MATERIALES	83
113	MATRICES EEM OBTENIDOS MEDIANTE ANÁLISIS PARAFAC, SOBRE LA 392 MATRICES MEDIDAS EN MUESTRAS PROCEDENTES DE LA CUENCA DE PINILLA	85
114	EJEMPLOS DE MODELACIÓN DE DOS EEM, MEDIDAS EN MUESTRAS DE LA CUENCA DE PINILLA MEDIANTE COMBINACIÓN LINEAL DE LOS 4 COMPONENTES IDENTIFICADOS POR EL ANÁLISIS PARAFAC	86
115	EVOLUCIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO DISUELTO (NPOC) Y DEL PORCENTAJE DE LOS DIFERENTES COMPONENTES PARAFAC IDENTIFICADOS EN ESTE ESTUDIO	88
116	PORCENTAJE MEDIO DE CADA COMPONENTE PRESENTE EN CADA ESTACION DE MUESTREO PARA EL CONJUNTO DE LAS MUESTRAS TOMADAS	89
117	PORCENTAJE MÁXIMO DE CADA COMPONENTE PRESENTE EN CADA ESTACIÓN DE MUESTREO PARA EL CONJUNTO DE LAS MUESTRAS TOMADAS	90
118	PORCENTAJE MEDIO DE MATERIA ORGANICA DISUELTA PARA CADA COMPONENTE Y PERIODO DE ESTUDIO	91
119	DIAGRAMA CONCEPTUAL DE SPARROW CON LA ECUACIÓN MAESTRA QUE SE HA DE CALIBRAR CON LOS DATOS DE CAMPO	98
120	ESTRUCTURA BASICA DEL MODELO SPARROW	99
121	MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (DEM) PARA LA CUENCA DE PINILLA, Y LAS 84 SUBCUENCAS CONSIDERADAS PARA LA MODELACIÓN EN SPARROW (arriba). USOS DEL SUELO CONSIDERADOS EN LA CUENCA, CON DETALLE DE LOS VERTIDOS PUNTUALES INCLUIDOS EN LA INFORMACIÓN FACILITADA POR LA CONFEDERACIÓN HIDROLÓGICA DEL TAJO (abajo)	100
122	CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE AMONIO CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW	103
123	CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE CARBONO TOTAL PARTICULADO CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW	104
124	CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW	105
125	CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW	106
126	CORRELACION ENTRE LAS CARGAS DE HIERRO CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW	107
127	CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE NITRATO CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW	108
128	CORRELACION ENTRE LAS CARGAS DE CARBONO NITROGENO TOTAL CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW	109
129	CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE FÓSFORO TOTAL CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW	110
130	CORRELACIÓN ENTRE LAS CARGAS DE SÍLICE CALCULADAS CON LOADEST Y LAS DE SPARROW	111
131	CARGA TOTAL DE AMONIO MODELADA CON SPARROW	113
132	CARGA INCREMENTAL DE AMONIO MODELADA CON SPARROW	114
133	CARGA TOTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	115
134	CARGA INCREMENTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	116
135	CARGA TOTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	117
136	CARGA INCREMENTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	118
137	CARGA TOTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	119
138	CARGA INCREMENTAL DE AMONIO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	120

Anexos

139	CARGA TOTAL DE CARBONO PARTICULADO MODELADA CON SPARROW	122
140	CARGA INCREMENTAL DE CARBONO PARTICULADO MODELADA CON SPARROW	123
141	CARGA TOTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	124
142	CARGA INCREMENTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	125
143	CARGA TOTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	126
144	CARGA INCREMENTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	127
145	CARGA TOTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	128
146	CARGA INCREMENTAL DE CARBONO PARTICULADO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	129
147	CARGA TOTAL DE DOC MODELADA CON SPARROW	131
148	CARGA INCREMENTAL DE DOC MODELADA CON SPARROW	132
149	CARGA TOTAL DE DOC, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	133
150	CARGA INCREMENTAL DE DOC, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	134
151	CARGA TOTAL DE DOC, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	135
152	CARGA INCREMENTAL DE DOC, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	136
153	CARGA TOTAL DE DOC, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	137
154	CARGA INCREMENTAL DE DOC, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	138
155	CARGA TOTAL DE DQO MODELADA CON SPARROW	140
156	CARGA INCREMENTAL DE DQO MODELADA CON SPARROW	141
157	CARGA TOTAL DE DQO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	142
158	CARGA INCREMENTAL DE DQO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	143
159	CARGA TOTAL DE DQO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	144
160	CARGA INCREMENTAL DE DQO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	145
161	CARGA TOTAL DE DQO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	146
162	CARGA INCREMENTAL DE DQO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	147
163	CARGA TOTAL DE HIERRO MODELADA CON SPARROW	149
164	CARGA INCREMENTAL DE HIERRO MODELADA CON SPARROW	150
165	CARGA TOTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	151
166	CARGA INCREMENTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	152
167	CARGA TOTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	153
168	CARGA INCREMENTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	154
169	CARGA TOTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	155

Anexos

170	CARGA INCREMENTAL DE HIERRO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	156
171	CARGA TOTAL DE MANGANESO MODELADA CON SPARROW	158
172	CARGA INCREMENTAL DE MANGANESO MODELADA CON SPARROW	159
173	CARGA TOTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	160
174	CARGA INCREMENTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	161
175	CARGA TOTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	162
176	CARGA INCREMENTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	163
177	CARGA TOTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	164
178	CARGA INCREMENTAL DE MANGANESO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	165
179	CARGA TOTAL DE NITRATO MODELADA CON SPARROW	167
180	CARGA INCREMENTAL DE NITRATO MODELADA CON SPARROW	168
181	CARGA TOTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	169
182	CARGA INCREMENTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	170
183	CARGA TOTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	171
184	CARGA INCREMENTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	172
185	CARGA TOTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	173
186	CARGA INCREMENTAL DE NITRATO, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	174
187	CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL MODELADA CON SPARROW	176
188	CARGA INCREMENTAL DE NITRÓGENO TOTAL MODELADA CON SPARROW	177
189	CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	178
190	CARGA INCREMENTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	179
191	CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	180
192	CARGA INCREMENTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	181
193	CARGA TOTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	182
194	CARGA INCREMENTAL DE NITRÓGENO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	183
195	CARGA TOTAL DE FÓSFORO TOTAL MODELADA CON SPARROW	185
196	CARGA INCREMENTAL DE FÓSFORO TOTAL MODELADA CON SPARROW	186
197	CARGA TOTAL DE FÓSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	187
198	CARGA INCREMENTAL DE FÓSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	188
199	CARGA TOTAL DE FÓSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	189
200	CARGA INCREMENTAL DE FÓSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	190

Anexos

201	CARGA TOTAL DE FÓSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	191
202	CARGA INCREMENTAL DE FOSFORO TOTAL, ASOCIADA A LA CATEGORIA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	192
203	CARGA TOTAL DE SÍLICE MODELADA CON SPARROW	194
204	CARGA INCREMENTAL DE SILICE MODELADA CON SPARROW	195
205	CARGA TOTAL DE SÍLICE, ASOCIADA A LA CATEGORÍA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	196
206	CARGA INCREMENTAL DE SILICE, ASOCIADA A LA CATEGORIA ALTURA DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	197
207	CARGA TOTAL DE SÍLICE, ASOCIADA A LA CATEGORÍA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	198
208	CARGA INCREMENTAL DE SILICE, ASOCIADA A LA CATEGORIA PRADOS DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	199
209	CARGA TOTAL DE SÍLICE, ASOCIADA A LA CATEGORÍA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	200
210	CARGA INCREMENTAL DE SILICE, ASOCIADA A LA CATEGORIA URBANO DE USO DEL SUELO, MODELADA CON SPARROW	201
211	COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE AMONIO, APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS	202
212	COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE CARBONO PARTICULADO, APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS	203
213	COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTU, APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS	203
214	COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO, APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS	203
215	COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE HIERRO, APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS	204
216	COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE MANGANESO APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS	204
217	COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE NITRATO, APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS	204
218	COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE NITRÓGENO TOTAL APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS	205
219	COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE FÓSFORO TOTAL APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS	205
220	COMPARATIVA ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGAS DE SILICE APORTADAS AL EMBALSE DE PINILLA DESDE LA EDAR Y DESDE EL RESTO DEL CONJUNTO DE ENTRADAS	205
221	FUNCIÓN QUE RELACIONA LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN TROS TRIBUTARIOS (PI), CON LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA ESPERADA, SEGÚN LAS ECUACIONES DEL CEDEX	211
222	DIAGRAMA DE VOLLENWEIDER CON LA POSICIÓN DEL EMBALSE DE PINILLA	212
223	RESULTADOS DEL MODELO PARA EL FÓSFORO TOTAL	214
224	RESULTADOS DEL MODELO PARA EL NITRÓGENO TOTAL	214
225	RESULTADOS DEL MODELO PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	215
226	DIAGRAMA DE LAS REDES NEURONALES APLICADAS A LOS TRES MODELOS CONSTRUIDOS: NITRÓGENO TOTAL, FÓSFORO TOTAL Y DQO	216
227	REPRESENTACIÓN DE LA PREDICCIÓN DEL MODELO PARA EL NITRÓGENO TOTAL, INCLUYENDO EL INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95% Y LOS VALORES OBSERVADOS	217
228	REPRESENTACION DE LA PREDICCIÓN DEL MODELO PARA EL FOSFORO TOTAL, INCLUYENDO EL INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95% Y LOS VALORES OBSERVADOS	218
229	REPRESENTACIÓN DE LA PREDICCIÓN DEL MODELO PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, INCLUYENDO EL INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95% Y LOS VALORES OBSERVADOS	218
230	EVOLUCIÓN DEL FACTOR DE ANOXIA Y RELACIÓN CON EL CAUDAL DE ENTRADA A LO LARGO DEL PERIODO DE ESTUDIO	220

Anexos

231	EVOLUCIÓN DEL FACTOR DE ANOXIA Y RELACIÓN CON LA CONCENTRACIÓN DE AMONIO, FOSFATO, HIERRO Y MANGANESO, A LO LARGO DEL PERIODO DE ESTUDIO	221
232	CONCENTRACION DEL OXIGENO DISUELTO EN EL HIPOLIMNION DEL EMBALSE DE PINILLA A LO LARGO DEL PERIODO DE ESTUDIO	222
233	FLUJO DE TRABAJO SEGUIDO PARA LA COMPARACIÓN ENTRE EL BALANCE DE OXIGENO Y LA DEGRADABILIDAD POTENCIAL DE LOS MATERIALES APORTADOS AL EMBALSE	223
234	EVOLUCION DE LA CONCENTRACION DE CLOROFILA Y LAS APORTACIONES DE CAUDAL EN EL EMBALSE DE PINILLA, ENTRE LOS AÑOS 2010 Y 2011	226
235	RELACIÓN ENTRE ESTACIÓN DEL AÑO, CAUDAL DE ENTRADA Y COMPOSICIÓN ALGAL EN EL EMBALSE DE PINILLA	227
236	FLUJO DE TRABAJO EN EL MARCO DE ESTE APARTADO, QUE INCLUYE LA UTILIZACION CONJUNTA DE LOS DATOS DE CAMPO Y DE LOS MODELOS DE CUENCA Y DEL EMBALSE PARA LA DEFINICIÓN DE ESCENARIOS APROPIADOS PARA MITIGAR EL PROCESO DE EUTROFIZACIÓN DE PINILLA	231
237	DIAGRAMA DE VOLLENWEIDER CON LA POSICIÓN DEL EMBALSE DE PINILLA EN LA SITUACIÓN BASE Y EN CADA UNO DE LOS TRES ESCENARIOS GENERADOS PARA EL FÓSFORO TOTAL	234
238	RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS SOBRE EL MODELO DE CARGA-RESPUESTA PARA LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA	235
239	RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS NT3 Y NT4 SOBRE EL MODELO DE RED NEURONAL PARA LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA	236
240	RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS PROPUESTOS SOBRE EL CONSUMO DE OXIGENO DURANTE EL PERIODO 1	241
241	RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS PROPUESTOS SOBRE EL CONSUMO DE OXÍGENO DURANTE EL PERIODO 2	241
242	RESULTADOS DE VARIACIÓN DE ESCORRENTÍA PARA TRES MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL DIFERENTES	244
243	MEDIA DE LOS RESULTADOS DE VARIACIÓN DE ESCORRENTÍA PARA LOS TRES MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL MOSTRADOS EN LA FIGURA ANTERIOR	244
244	PREDICCIONES CLIMATICAS PARA LA CUENCA DEL TAJO PARA LOS TRES HORIZONTES TEMPORALES CONSIDERADOS EN EL TRABAJO DEL CEDEX	246
245	VARIACIÓN PORCENTUAL DEL CAUDAL DE LOS RIOS PENINSULARES EN EL HORIZONTE 2011-2040 PARA EL ESCENARIO B2 Y A2	247
246	CAUDALES DE ENTRADA A PINILLA PARA UN AÑO TIPO DEL PERIODO 1989-2010 Y DEL PERIODO 2011-2040	248
247	RESULTADOS DEL MODELO NEURONAL PARA CLOROFILA, PARA EL ESCENARIO DE CONTROL 1988-2010 Y PARA EL HORIZONTE 2011-2040	249

8.2. ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
1	PROCESOS DE REDISOLUCIÓN DESDE EL SEDIMENTO EN EL EMBALSE DE LA PINILLA	16
2	PARÁMETROS MEDIDOS POR EL DEPARTAMENT ODE AGUAS NATURALES	18
3	CONTROL DE CARGAS DE AMONIO	19
4	DEFINICION DE ESCENARIOS PARA EL BALANCE DE OXIGENO	20
5	PARÁMETROS MEDIDOS POR EL DEPARTAMENTO DE AGUAS NATURALES	30
6	VALORES DE Φ_{MEAN} Y K_{MEAN} CALCULADOS PARA CADA PUNTO DE MUESTREO	32
7	MODELOS SELECCIONADOS Y COEFICIENTES DE REGRESIÓN PARA CADA PUNTO Y PARÁMETRO	35
8	BALANCE DE CARGAS DE FOSFORO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA	42
9	BALANCE DE CARGAS DE NITRÓGENO TOTAL EN EL EMBALSE DE PINILLA	45
10	BALANCE DE CARGAS DE NITROGENO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA	48
11	BALANCE DE CARGAS DE CARBONO TOTAL PARTICULADO EN EL EMBALSE DE PINILLA	51
12	BALANCE DE CARGAS DE CARBONO ORGANICO DISUELTO EN EL EMBALSE DE PINILLA	54
13	BALANCE DE CARGAS DE NITRITO EN EL EMBALSE DE PINILLA	55
14	BALANCE DE CARGAS DE AMONIO EN EL EMBALSE DE PINILLA	57
15	BALANCE DE CARGAS DE DQO EN EL EMBALSE DE PINILLA	60
16	BALANCE DE CARGAS DE NITRATO EN EL EMBALSE DE PINILLA	64
17	BALANCE DE CARGAS DE FOSFATO EN EL EMBALSE DE PINILLA	67
18	BALANCE DE CARGAS DE HIERRO EN EL EMBALSE DE PINILLA	70
19	BALANCE DE CARGAS DE MANGANESO EN EL EMBALSE DE PINILLA	73
20	BALANCE DE CARGAS DE CLORURO EN EL EMBALSE DE PINILLA	77
21	BALANCE DE CARGAS DE SÍLICE EN EL EMBALSE DE PINILLA	80
22	PUNTOS DE MUESTREO Y NUTRIENTES PARA LOS CUALES SE REGISTRARON, DE FORMA NETA, PROCESOS DE AUTODEPURACIÓN	81
23	PUNTOS DE MUESTREO Y NUTRIENTES PARA LOS CUALES SE REGISTRARON, DE FORMA NETA, APORTES DE LA CUENCA PROPIA	82
24	COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE DE PINILLA RESPECTO A CADA UNO DE LOS NUTRIENTES ANALIZADOS	83
25	PORCENTAJE DE LAS APORTACIONES AL EMBALSE DE PINILLA PARA LAS TRES PRINCIPALES ENTRADAS (PUNTOS 11, 13 Y 16)	84
26	PORCENTAJE MEDIO DE CADA COMPONENTE PARAFAC MEDIDO EN LA MATERIA ORGANICA DISUELTA EN CADA UNO DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	92
27	PORCENTAJE MÍNIMO DE CADA COMPONENTE PARAFAC MEDIDO EN LA MATERIA ORGANICA DISUELTA EN CADA UNO DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	93
28	PORCENTAJE MAXIMO DE CADA COMPONENTE PARAFAC MEDIDO EN LA MATERIA ORGANICA DISUELTA EN CADA UNO DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	93
29	VALORES DE LOS PARAMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL AMONIO, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO	103
30	VALORES DE LOS PARAMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACION PARA EL CARBONO TOTAL PARTICULADO, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO	104
31	VALORES DE LOS PARAMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL CARBONO ORGÁNICO DISUELTO (DOC), E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO	105
32	VALORES DE LOS PARAMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO	106
33	VALORES DE LOS PARAMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL HIERRO, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO	107

Anexos

34	VALORES DE LOS PARAMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL NITRATO, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO	108
35	VALORES DE LOS PARAMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL NITRÓGENO TOTAL, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO	109
36	VALORES DE LOS PARAMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACION PARA EL FOSFORO TOTAL, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO	110
37	VALORES DE LOS PARAMETROS RESULTANTES DE LA CALIBRACIÓN PARA EL SÍLICE, E INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA UNO	111
38	VALORES DE r^2 PARA CADA UNO DE LOS TRES MODELOS DE RED NEURONAL DIFERENCIANDO EL GRUPO DE CALIBRACIÓN Y EL DE VERIFICACIÓN	217
39	COMPONENTES SELECCIONADOS DEL BALANCE DE OXÍGENO HIPOLIMNÉTICO EN EL EMBALSE DE PINILLA, PARA LOS DOS PERIODOS CONSIDERADOS EN LA FIGURA 232	224
40	COMPONENTES SELECCIONADOS DEL BALANCE DE OXIGENO HIPOLIMNETICO EN EL EMBALSE DE PINILLA, PARA LOS DOS PERIODOS CONSIDERADOS EN LA FIGURA 232	224
41	ESCENARIOS PROPUESTOS PARA EL FÓSFORO TOTAL	233
42	RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS PARA EL FOSFORO TOTAL	233
43	ESCENARIOS PROPUESTOS PARA EL NITRÓGENO TOTAL (CON REFERENCIA AL AMONIO)	234
44	ESCENARIOS PROPUESTOS PARA EL AMONIO	237
45	RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS PARA EL AMONIO	237
46	ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA DQO	238
47	RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA DQO	239
48	ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA COMBINACION DQO + NH_4^+	239
49	RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA COMBINACIÓN DQO + NH_4^+	240
50	RESUMEN DE LOS RESULTADOS PARA EL CONJUNTO DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS	242
51	EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA ESCORRENTÍA EN LA CUENCA DEL TAJO, ESCENARIO A2	247
52	EFECTO DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE LA ESCORRENTIA EN LA CUENCA DEL TAJO, ESCENARIO B2	247

8.3. BIBLIOGRAFÍA

Alexander, R. B., R. A. Smith, and G. E. Schwarz

Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico, (2000), *Nature* 403, 758-761

Alexander, R. B., P. J. Johnes, E. W. Boyer, and R. A. Smith

A Comparison of Models for Estimating the Riverine Export of Nitrogen From Large Watersheds, (2002), *Biogeochemistry*, 57 / 58, 295-339

Beutel, M.

Hypolimnetic Anoxia and Sediment Oxygen Demand in California Drinking Water Reservoirs. (2003). *Lake and Reservoir Management*, 19, 208-221

CEDEX

Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. CEDEX (2011), Madrid. 281 pp.

Chapra, S.C.

Surface water-quality modeling, (1997). McGraw-Hill. Boston

Emerson, D. G., A. V. Vecchia, and A. L. Dahl

Evaluation of Drainage-Area Ratio Method Used to Estimate Streamflow for the Red River of the North Basin, North Dakota and Minnesota, (2005), *Scientific Investigations Report* 2005-5017

Grasshoff, K., M. Erhardt and K. Kremling

Methods for seawater analysis, (1983), Verlag Chemie. Weinheim

Kowalczyk, P., J. Ston-Egiert, W. J. Cooper, R. F. Whitehead, and M. J. Durako (2005) Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Baltic Sea by excitation emission matrix fluorescence spectroscopy. *Mar. Chem.* 96: 273-292

Marcé R, Comerma M, García JC, Armengol J.

A neuro-fuzzy modelling tool to estimate fluvial nutrient loads in watersheds under time-varying human impact, (2004). *Limnol Oceanogr.: Methods* 2:342-55

Marcé R., Moreno-Ostos E., López P., and Armengol J.

The role of allochthonous inputs of dissolved organic carbon on the hypolimnetic oxygen content of reservoirs, (2008). *Ecosystems*, 11, 1035-1053

Marcé, R., M. À. Rodríguez-Arias, J. C. García, and J. Armengol

El Niño Southern Oscillation and climate trends impact reservoir water quality, (2010). *Global Change Biol.* 16: 2857-2865

Murphy, J., and J. P. Riley

A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters, (1962), *Anal. Chim. Acta* 27: 31-36

Ortiz, J.L., Peña, R., Lee, G.F. y Jones R.A.

Aportación de nutrientes y eutrofización de embalses, (1983), CEDEX, Madrid

Stedmon, C. A., and R. Bro.

Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial, (2008), *Limnol. Oceanogr. Methods* 6: 572-579.



Santa Engracia, 125. 28003 Madrid
www.gestioncanal.es