



Exploring the possibilities of parsimonious nitrogen modelling in different ecosystems

Autora: Cristina Puertas

Directores: Félix Francés, Antonio Lidón e Inmaculada Bautista

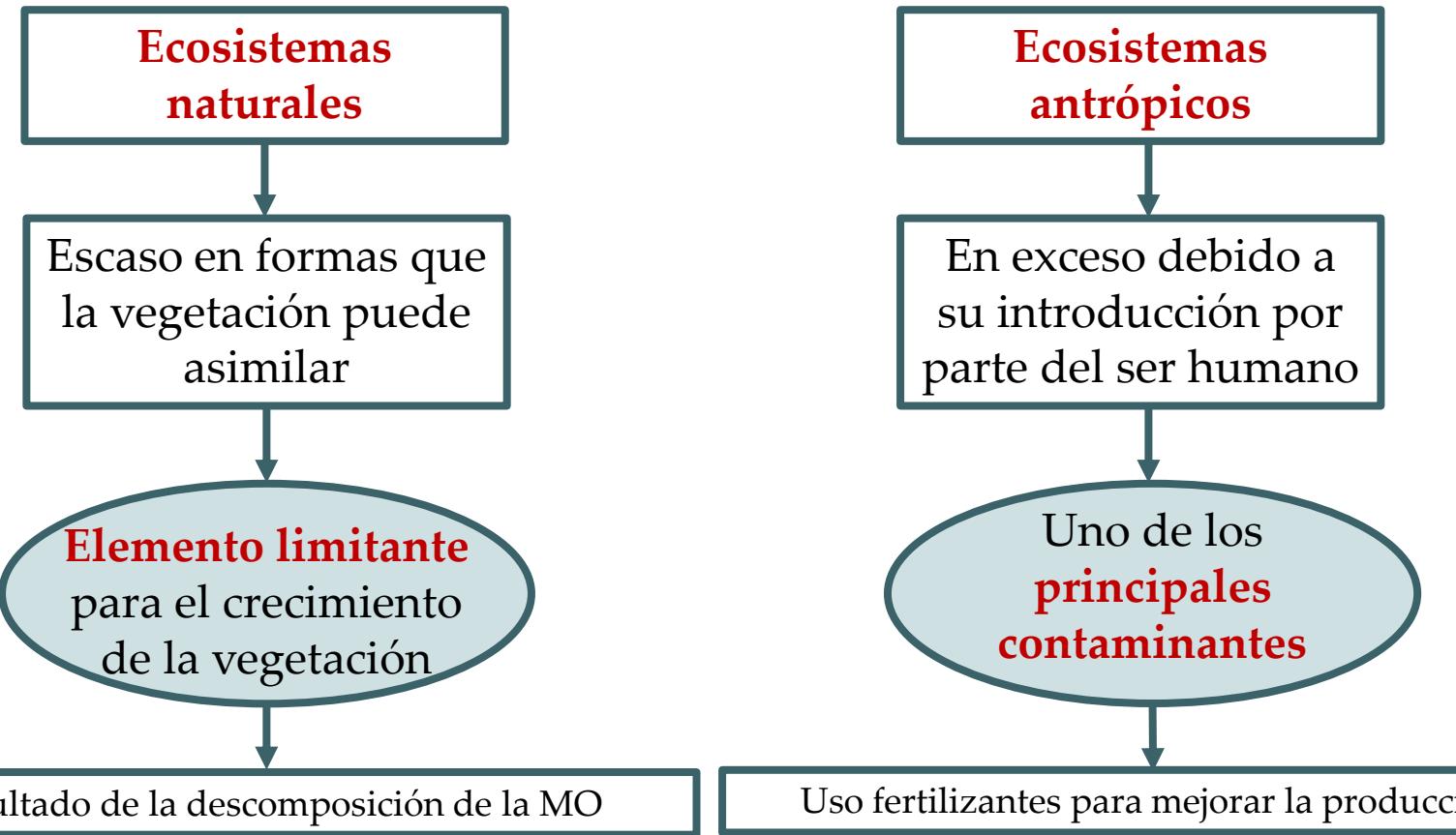
Enero 2020

Índice

- Introducción
- Objetivos
- El monte de La Hunde: un ecosistema natural
- El Mar Menor: un ecosistema antrópico
- Conclusiones generales
- Líneas futuras de investigación
- Difusión de resultados

Introducción

- El nitrógeno es un componente fundamental de los organismos vivos

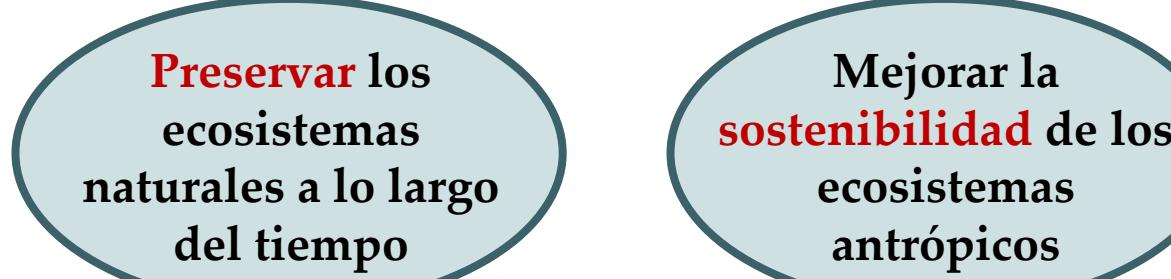


Introducción

- Ambos ecosistemas producen importantes bienes y servicios para el bienestar del ser humano
- Los ecosistemas naturales como pastos y bosques
 - Proporcionan productos cosechables
 - Regulan el clima, el ciclo hidrológico y los ciclos minerales
 - Protegen el suelo contra la erosión
 - Previenen inundaciones
- Los ecosistemas antrópicos como la agricultura intensiva proporcionan
 - Alimentos
 - Fibra
 - Piensos
 - Biocombustibles

Introducción

Mantener nuestros niveles de calidad de vida

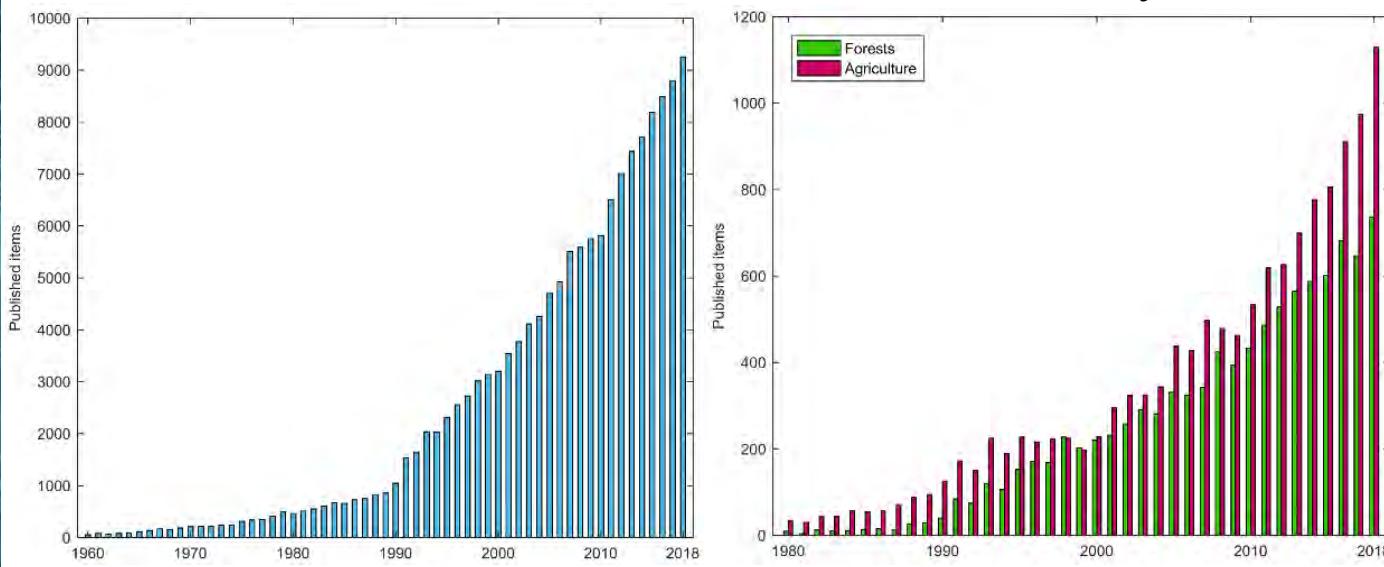


- Especialmente en la región Mediterránea
 - Destaca en las proyecciones de cambio climático como una zona en la que la sequía aumenta en cualquier escenario (Spinoni et al., 2018)
 - Ha mostrado una tendencia de precipitación negativa a lo largo del siglo XX (Cook et al., 2018)

Se esperan alteraciones en el ciclo hidrológico y los ciclos biogeoquímicos

Introducción

- Mejorar el conocimiento de los procesos de almacenamiento, transporte y transformación del nitrógeno es una prioridad para la comunidad hidrológica (Schlesinger et al., 2006)
- Los modelos son herramientas útiles para analizar las relaciones y comportamiento de los ecosistemas (Landsberg, 2003)
 - Dar soporte a las decisiones relacionadas con la gestión de los ecosistemas
 - Incremento histórico desde los años 60 hasta hoy en día



Necesidad de seguir desarrollando y probando modelos de nitrógeno

Introducción

- Modelos de escala de parcela
- Modelos de escala de cuenca

Introducción

- Modelos de escala de parcela
 - Más complejos (físicamente basados)
 - Representación precisa del ciclo hidrológico y los ciclos de C y N
 - Parametrizados para una única especie
 - Incluyen las dinámicas de la biomasa microbiana a través del ciclo del carbono → Proceso de mineralización
 - Crecimiento de la vegetación
 - Varios tipos materia orgánica
- Presentan un alto número de parámetros (Hätkönen et al., 2019; Jabloun et al., 2018)
 - Implementaciones complicadas
 - Elevados tiempos de cálculo debido a su compleja estructura

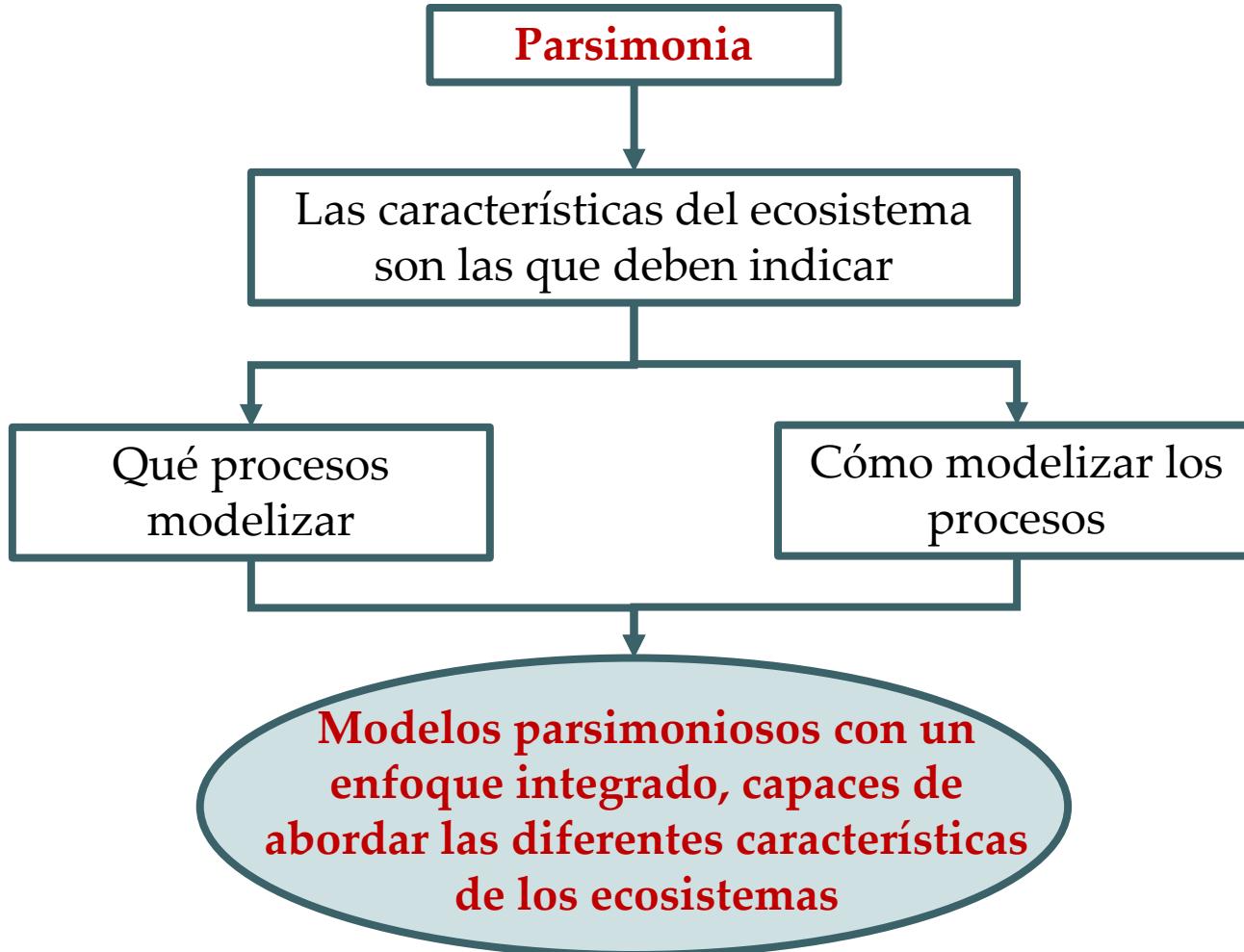
Aplicación a escala de cuenca es complicada

Introducción

- Modelos de escala de parcela
- Modelos de escala de cuenca
 - Más simples (conceptuales)
 - Dividen el área en celdas, simulan las variables de estado en cada celda y ensamblan los resultados para todo el área de estudio
 - No incluyen el ciclo del carbono
 - Reemplazado por un conjunto de parámetros
 - Calibración más sencilla debido al menor número de parámetros
 - Empleados para desarrollar planes de cuenca

Pueden ser demasiado simplificados

Introducción



Objetivos

- Mejorar la modelización del ciclo del nitrógeno bajo el principio de que todo debe hacerse lo más simple posible, pero no más simple (Stocker et al., 2016)
 - Explorar diferentes enfoques parsimoniosos para la modelización del nitrógeno en el continuo planta-suelo-agua en ecosistemas semiáridos naturales y antrópicos
 - Comprender las interacciones del ciclo del nitrógeno con el agua, la vegetación, los sedimentos y cómo modelizarlas
- Enfoque progresivo consistente en la modelización del ciclo del nitrógeno en dos ecosistemas diferentes
 - Ecosistema semiárido natural: el monte de La Hunde
 - Ecosistema semiárido antrópico: El Mar Menor

El monte de La Hunde: un ecosistema natural



Modelización de los ecosistemas naturales

- Ecosistemas Mediterráneos

- Suelos pobres en nutrientes
- N es un elemento limitante para su desarrollo (Sardans et al., 2008; Uscola et al., 2017)

Emplear modelos que incluyan el ciclo del N para preservarlos

- Disponibilidad de N condicionada por la actividad microbiana

- Nmin es el resultado de la descomposición de la materia orgánica del suelo

Incluir el ciclo del carbono para una precisa modelización

- Humedad del suelo y temperatura principales factores ambientales influenciando estos ciclos biogeoquímicos, especialmente en climas semiáridos

Corrección de los procesos por temperatura y humedad

Objetivos específicos del ecosistema natural

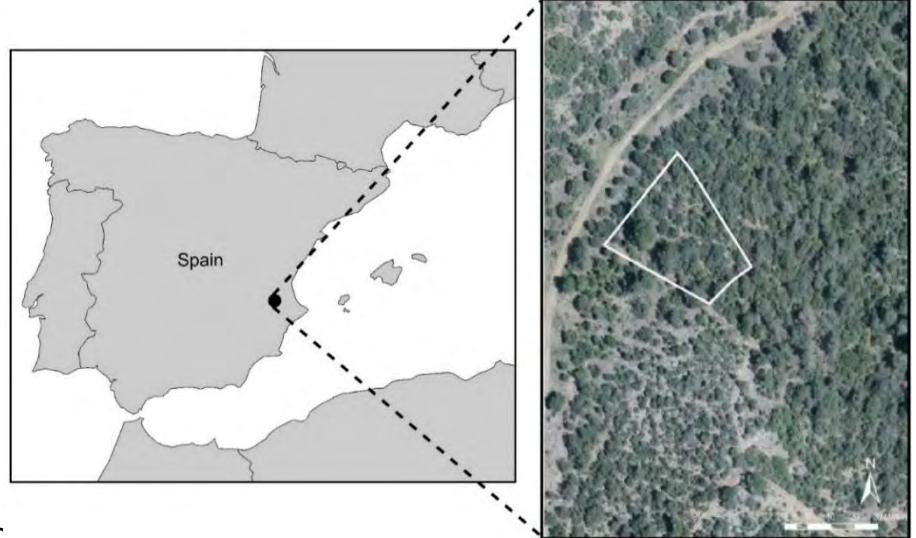
Modelo de escala diaria que incluya el ciclo hidrológico y los ciclos de nitrógeno y carbono

- Desarrollo del modelo parsimonioso TETIS-CN
- Implementado en una parcela experimental
- Objetivos:
 - Contribuir a mejorar la modelización del ciclo de nitrógeno
 - Evaluar las capacidades del modelo TETIS-CN mediante la comparación con los modelos físicamente basados:
 - BIOME-BGCMuSo v5.0
 - LEACHM

Área de estudio

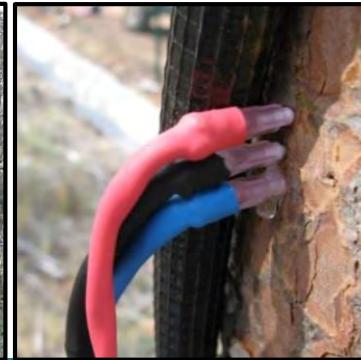
- Características de la parcela

- Superficie: 1800 m²
- Suelos poco profundos (10-40 cm)
- Piedra caliza karstificada
 - Acuífero colgado
- Clima semiárido
 - Precipitación: 466 mm/año
 - ET₀: 1200 mm/año
 - Temperatura media anual: 12.8 °C
- Bosque de *Quercus ilex* de alta densidad
 - Otras especies: *Pinus halepensis*, *Q. faginea*, *Juniperus phoenicea* y *J. oxycedrus*

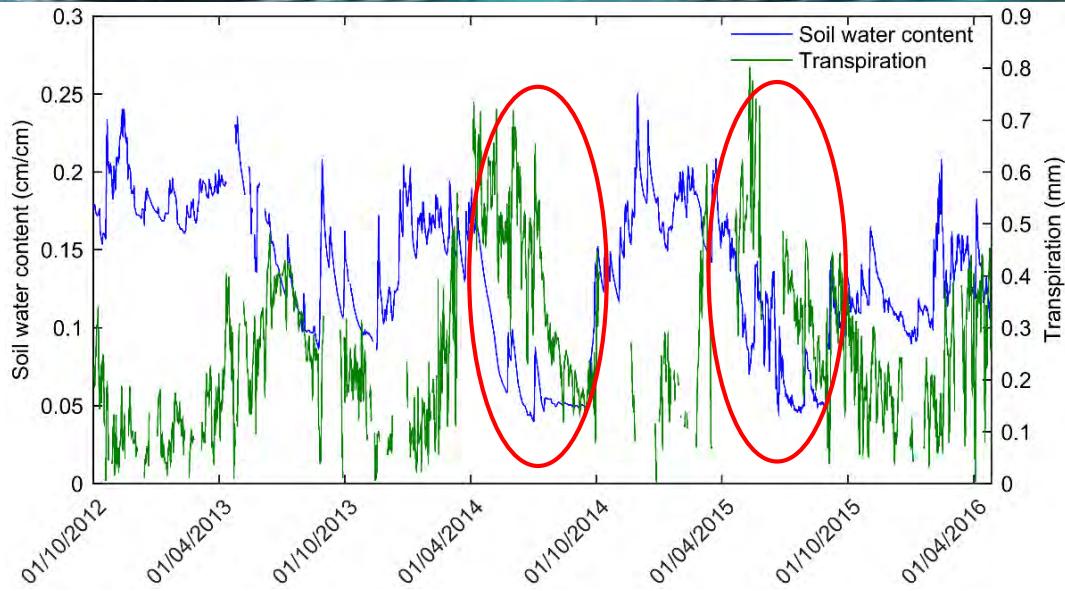


Variables de estado

- Meteorología:
 - Temperatura del aire
 - Humedad relativa
 - Precipitación
- Hidrología:
 - Trascolación
 - Escorrentía superficial
 - Humedad del suelo
 - Transpiración
- Vegetación
 - LAI
 - Medición en campo
 - Satélite
- Biogeoquímica del suelo
 - Primeros 15 cm de suelo
 - Mineralización
 - Nitrificación
 - Lixiviación de nitrógeno
 - Contenido de NH_4^+ en el suelo
 - Contenido de NO_3^- en el suelo
 - Respiración del suelo



Variables de estado



Transpiración
adicional de recursos
subterráneos

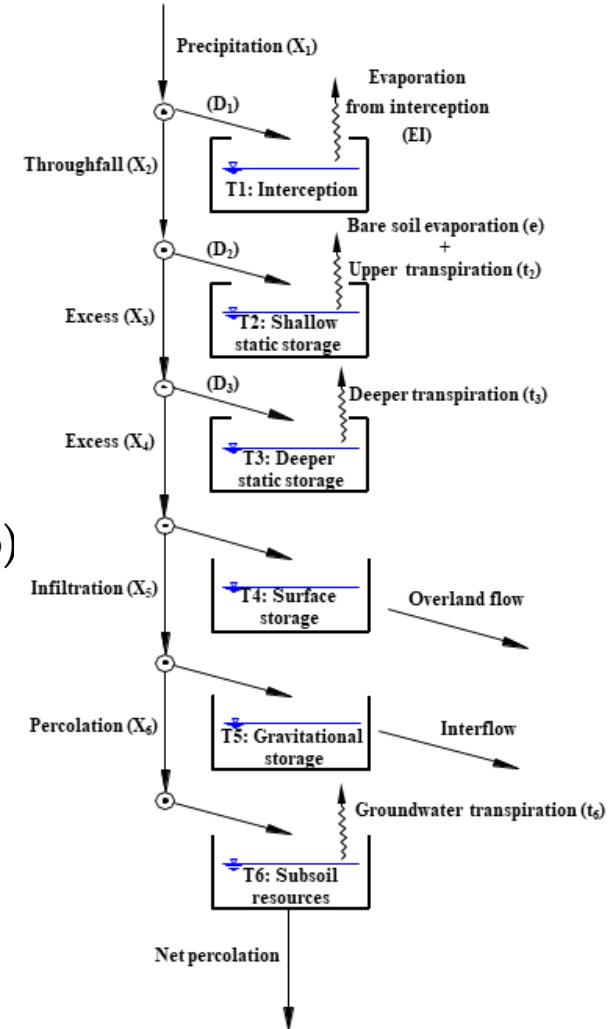
- Climas semiáridos → contribución clave a la transpiración total (Barbeta and Peñuelas, 2017)
- Freatofita facultativa → condicionar la disponibilidad de agua (Vicente et al., 2018)

Los modelos hidrológicos convencionales no la consideran

El modelo TETIS-CN

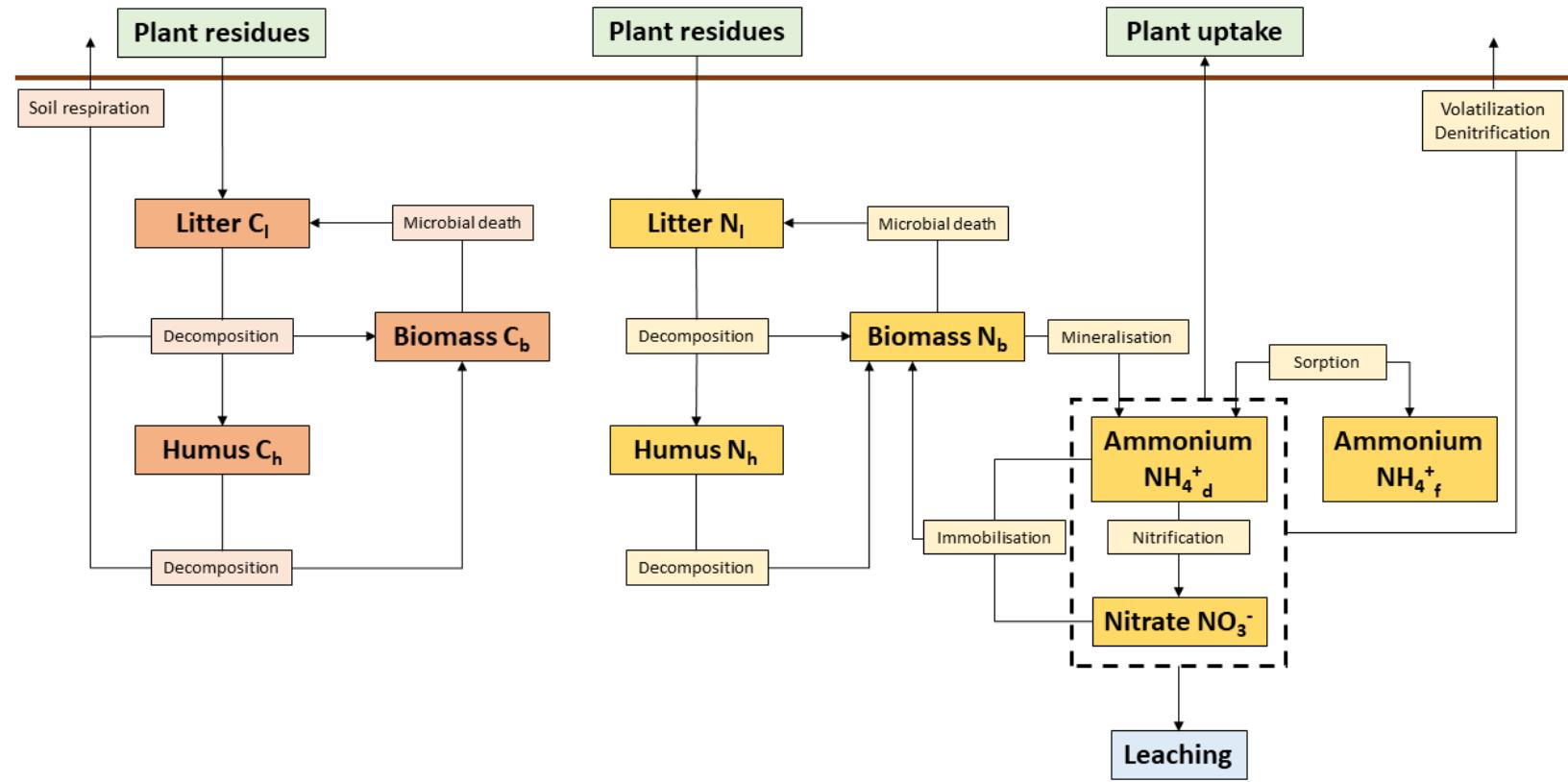
- Submodelo hidrológico

- Basado en una estructura de tanques verticales
- Representa la ladera mediante 5 tanques
 - El suelo está dividido en dos capas
 - Capa superficial (T2)
 - Evaporación de suelo desnudo
 - Transpiración
 - Capa profunda (T3)
 - Transpiración
 - Nuevo tanque localizado entre suelo y acuífero (T6)
 - Transpiración de recursos subterráneos
 - Dos nuevos parámetros:
 - Límite de humedad de suelo
 - Porcentaje de raíces capaz de alcanzar los recursos



El modelo TETIS-CN

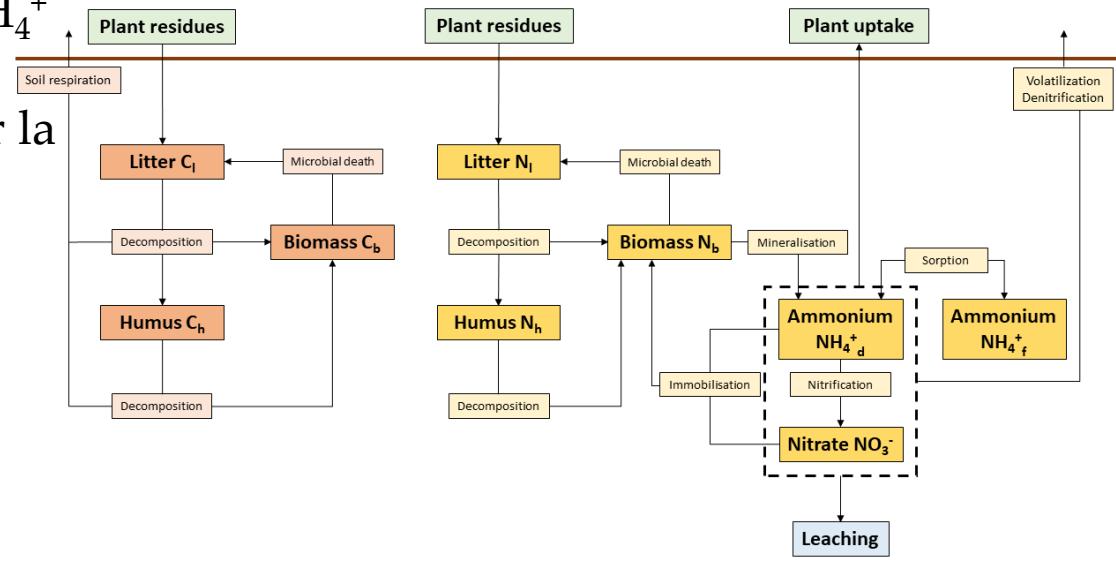
- Submodelo de carbono y nitrógeno



El modelo TETIS-CN

- Submodelo de carbono y nitrógeno

- Balance de masas
 - Calculado en términos de Corg para la fracción orgánica
 - Transformado a N por medio de las relaciones C/N de cada fracción
- K1
 - Humedad y temperatura
 - Influencia de la biomasa (Frac. Org.)
- Adsorción-desorción de NH_4^+
 - Isoterma lineal
- Extracción de nitrógeno por la vegetación:
 - Activa: transpiración
 - Pasiva: difusión
- Movimiento advectivo de solutos



Comparación de modelos

	BIOME	LEACHM	TETIS-CN
Parámetros hidrológicos	-	$19 + 9n$	21
Parámetros de carbono y nitrógeno	-	$19 + 5n$	19
Parámetros totales	194	$34 + 14n$	40
Número de capas de suelo	10	n	2
Movimiento de agua en el suelo	<i>Tipping bucket</i> (capas de suelo)	Ecuación de Richards	<i>Tipping bucket</i> (4 tanques)
Proceso de transpiración	Penman-Monteith con conductancia estomatal	Nimah and Hanks (1973)	Función multiplicativa que incluye corrección por variables ambientales
Fracciones de litter	5	1	1
Fracciones de materia orgánica del suelo	4	2	2
Fracciones de nitrógeno mineral	2	2	2
Descomposición de materia orgánica	k1	k1	k1
Transf. de nitrógeno inorgánico	k1	k1	k1
Adsorción – desorción de NH4+	Porcentaje fijo	Isoterma lineal	Isoterma lineal
Movimiento de solutos	Movimiento advectivo	Convección – difusión	Movimiento advectivo

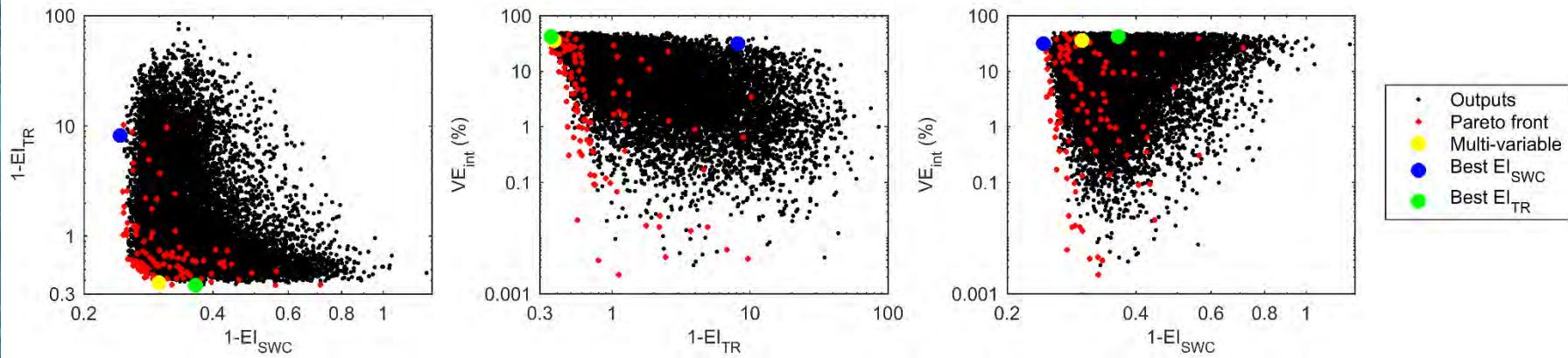
Implementación de los modelos

- Hidrología: todo el perfil
 - Periodo de calibración: 01/10/12 – 30/09/14
 - Periodo de validación: 01/10/14 – 26/04/16
 - Variables de estado empleadas:
 - Humedad del suelo diaria → NSE
 - Transpiración semanal → NSE
 - Intercepción acumulada (sólo calibración en BIOME y TETIS-CN) → ErrVol
- C y N: los primeros 15 cm de suelo
 - Periodo de calibración: 01/10/12 – 30/09/13
 - Periodo de validación: 01/10/13 – 30/09/14
 - Variables de estado empleadas:
 - Contenido de N-NH₄⁺ en el suelo → RMSE
 - Contenido de N-NO₃⁻ en el suelo → RMSE
 - Mineralización neta acumulada → RMSE
 - Nitrificación neta acumulada → RMSE
 - Lixiviación de nitrógeno mineral (sólo validación) → RMSE
 - Respiración heterótrofa (sólo validación) → RMSE

Implementación de los modelos

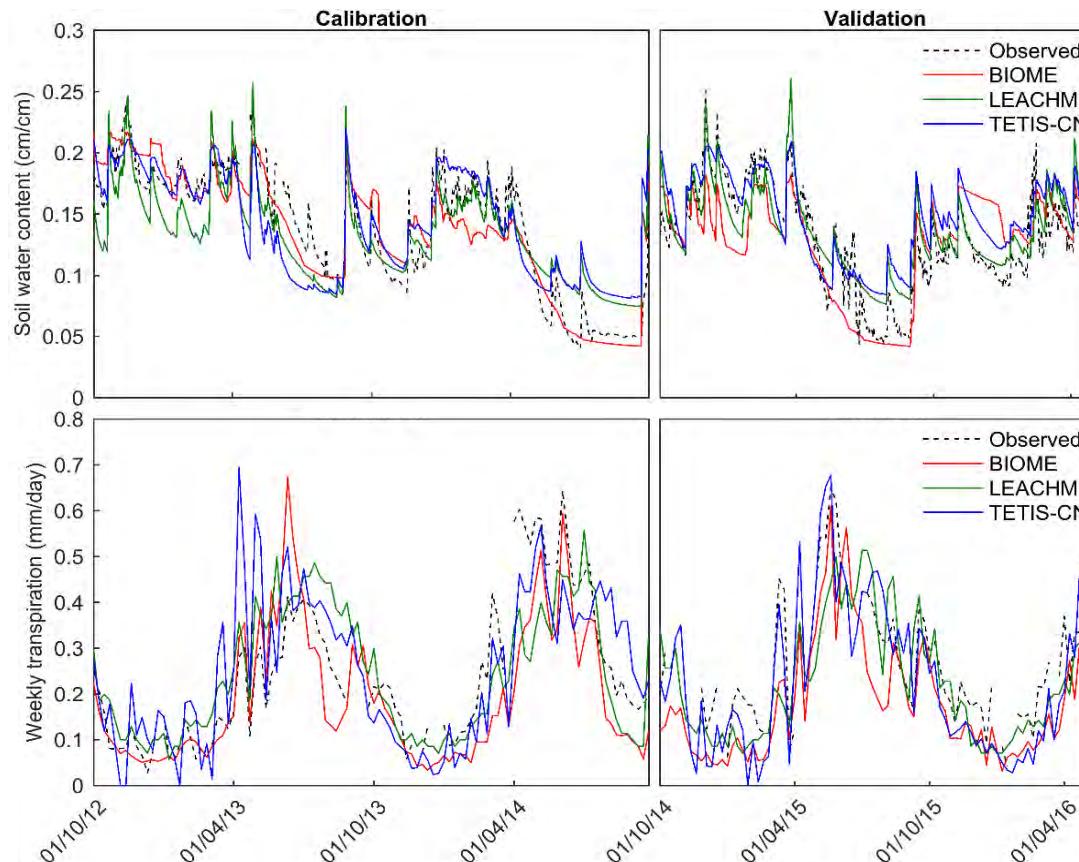
- Proceso de calibración

- BIOME: calibración conjunta usando PEST (Doherty, 2007)
- LEACHM y TETIS-CN: calibración multiobjetivo, multivariable por partes
 - Calibración basada en el concepto de frontera de Pareto mediante el algoritmo Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metropolis (Vrugt et al., 2003)
 - Calibración hidrológica inicial
 - Posterior calibración de los ciclos de C y N
 - Criterio de selección: distancia Euclidea



Resultados y discusión

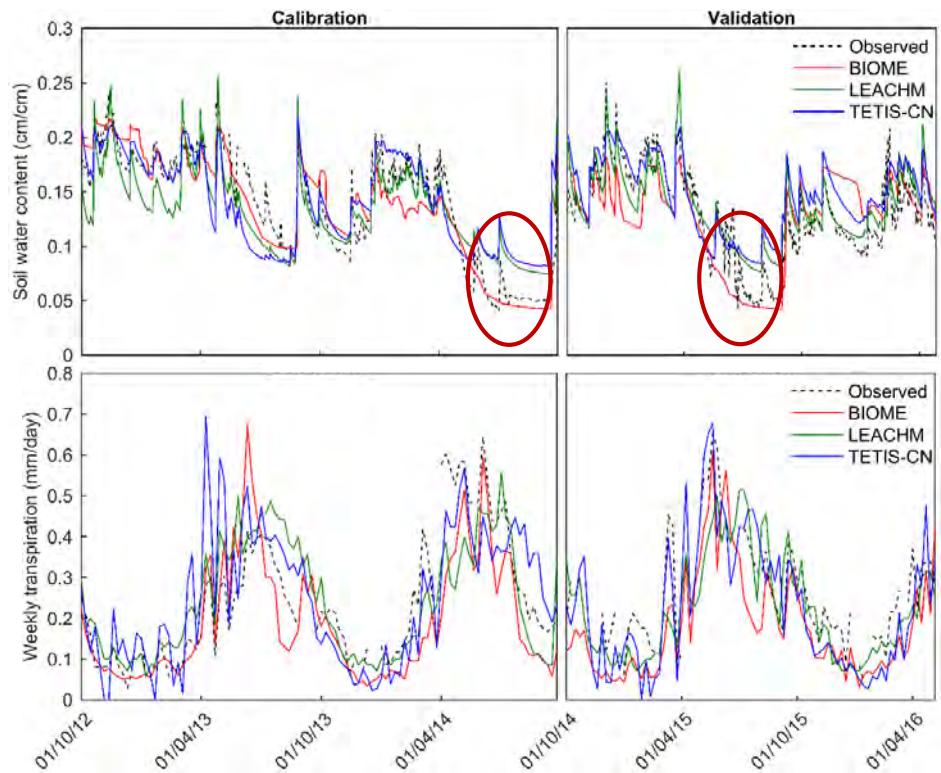
	Calibración (NSE)			Validación (NSE)		
	BIOME	LEACHM	TETIS-CN	BIOME	LEACHM	TETIS-CN
Humedad del suelo	0.82	0.74	0.70	0.46	0.74	0.59
Transpiración	0.62	0.64	0.62	0.54	0.62	0.72



Resultados y discusión

	Calibración (NSE)			Validación (NSE)		
	BIOME	LEACHM	TETIS-CN	BIOME	LEACHM	TETIS-CN
Humedad del suelo	0.82	0.74	0.70	0.46	0.74	0.59
Transpiración	0.62	0.64	0.62	0.54	0.62	0.72

- BIOME presenta problemas de sobreparametrización
- LEACHM y TETIS-CN presentan una representación simplificada del proceso de transpiración:
 - LEACHM: valores semanales de ET_0
 - TETIS-CN: 2 capas de suelo
 - Transpiración explicada por VPD (del Campo et al., 2019)
- BIOME no está diseñado para climas semiáridos



Resultados y discusión

Flujos del balance hidrológico (mm)	Observado	BIOME	LEACHM	TETIS-CN
Precipitación	426.2	426.2	-	426.2
Intercepción	129.2	129.5	-	81.4
Precipitación neta	297.1	296.7	297.1	344.8
Evaporación del suelo	-	34.4	64.4	118.7
Transpiración del suelo	-	49.9	68.9	49.6
Transpiración de recursos subterráneos	-	22.2	21.0	44.2
Transpiración total	101.6	72.1	89.9	93.7
Esorrentía superficial	4.6	4.0	3.0	0.0
Percolación neta	-	188.5	140.8	137.5

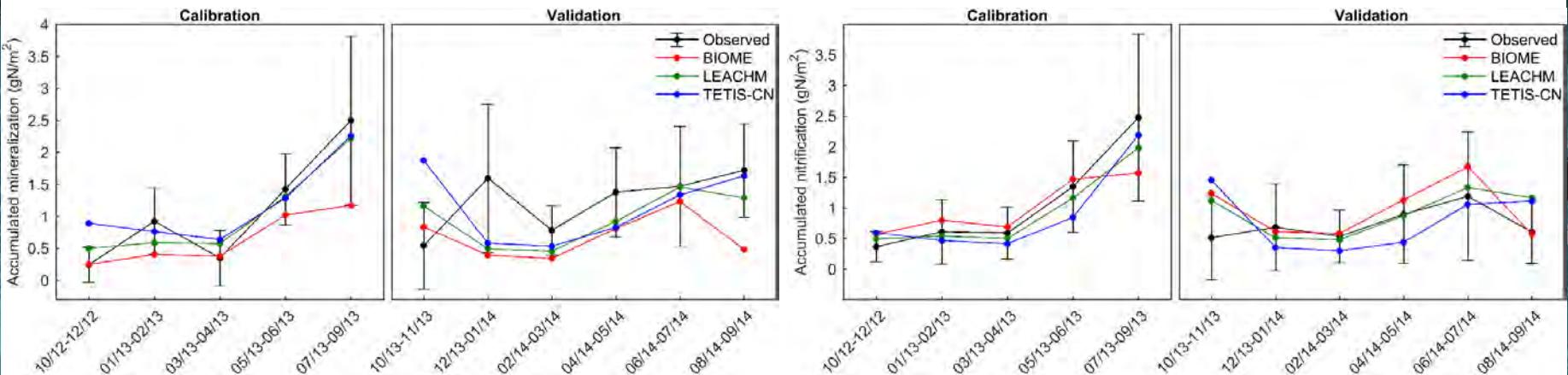
- El mecanismo incluido en TETIS-CN, aunque satisfactorio, puede resultar simple y es posible mejorararlo

	Transpiración	Transpiración (verano)	Evapotranspiración
BIOME	30.8%	48.7%	9.9%
LEACHM	23.4%	42.3%	7.4%
TETIS-CN	47.2%	76.4%	15.0%

- 70% transpiración (Hubbert et al., 2001); 6.7% evapotranspiración (Hassan et al., 2014); 70% (David et al., 2007) y 50 % transpiración en verano (Balugani et al., 2017)

Resultados y discusión

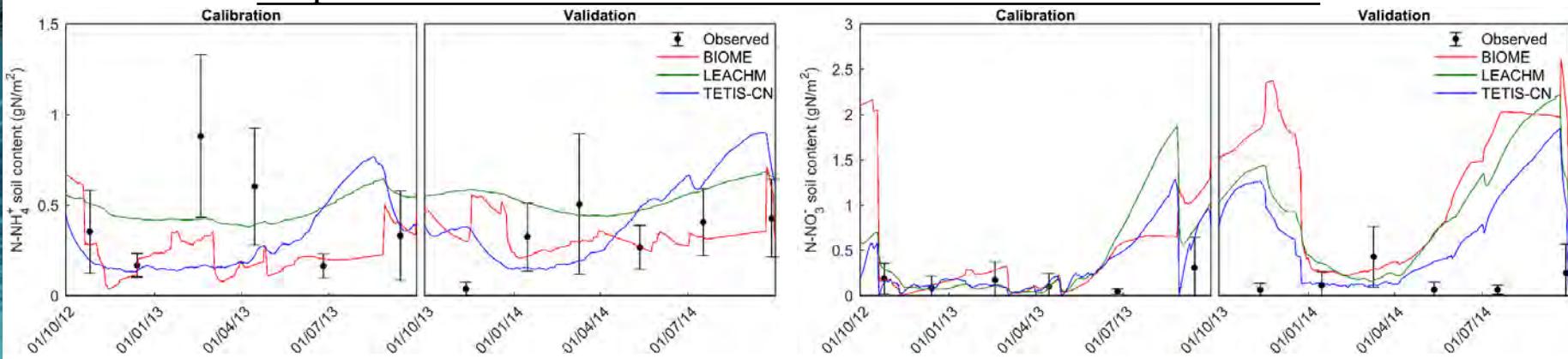
	Calibración (RMSE)			Validación (RMSE)		
	BIOME	LEACHM	TETIS-CN	BIOME	LEACHM	TETIS-CN
Mineralización	0.66	0.25	0.35	0.78	0.59	0.73
Nitrificación	0.43	0.25	0.30	0.37	0.35	0.51
N-NH₄⁺	0.30	0.29	0.36	0.16	0.28	0.26
N-NO₃⁻	0.38	0.31	0.22	1.3	0.94	0.74
Lixiviación	-	-	-	0.77	0.47	0.36
Respiración	-	-	-	0.89	0.98	0.52



- BIOME infraestima la mineralización media
- TETIS-CN sobreestima la mineralización los meses de octubre – noviembre:
 - Funciones de corrección de temperatura y humedad del suelo varían en un rango más amplio

Resultados y discusión

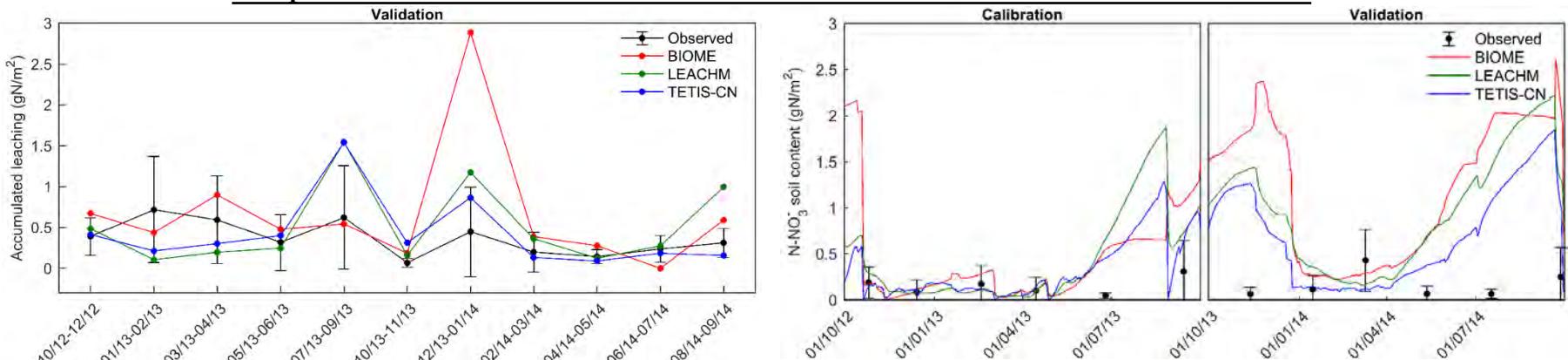
	Calibración (RMSE)			Validación (RMSE)		
	BIOME	LEACHM	TETIS-CN	BIOME	LEACHM	TETIS-CN
Mineralización	0.66	0.25	0.35	0.78	0.59	0.73
Nitrificación	0.43	0.25	0.30	0.37	0.35	0.51
N-NH₄⁺	0.30	0.29	0.36	0.16	0.28	0.26
N-NO₃⁻	0.38	0.31	0.22	1.3	0.94	0.74
Lixiviación	-	-	-	0.77	0.47	0.36
Respiración	-	-	-	0.89	0.98	0.52



- NO₃⁻ está sobreestimado durante los meses más cálidos
 - Nitrificación bien representada
 - Desnitrificación no es importante:
 - Ecosistemas naturales con climas semiáridos
 - ¿Lixiviación o extracción de N por la vegetación?

Resultados y discusión

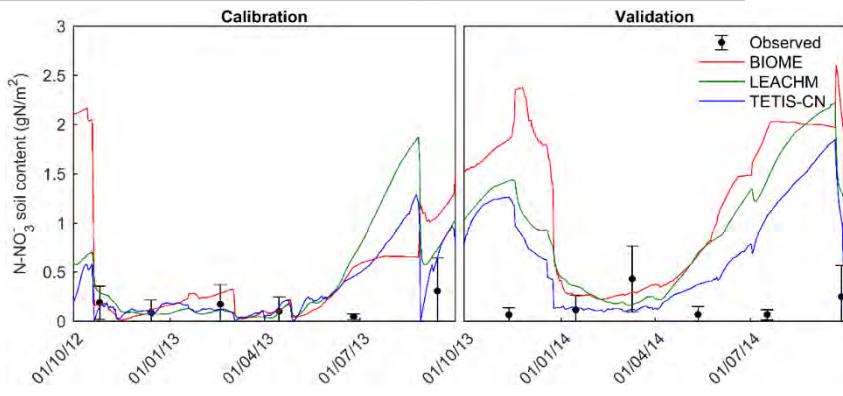
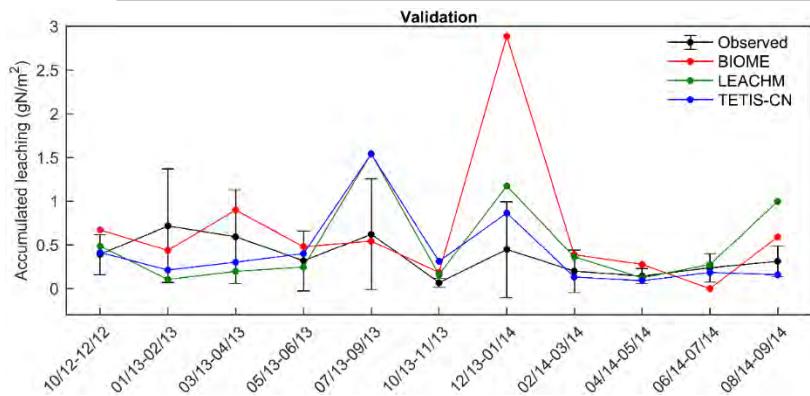
	Calibración			Validación		
	BIOME	LEACHM	TETIS-CN	BIOME	LEACHM	TETIS-CN
Mineralización	0.66	0.25	0.35	0.78	0.59	0.73
Nitrificación	0.43	0.25	0.30	0.37	0.35	0.51
N-NH₄⁺	0.30	0.29	0.36	0.16	0.28	0.26
N-NO₃⁻	0.38	0.31	0.22	1.3	0.94	0.74
Lixiviación	-	-	-	0.77	0.47	0.36
Respiración	-	-	-	0.89	0.98	0.52



- La lixiviación está sobreestimada durante los mismos meses
 - La extracción de NO₃⁻ por parte de la vegetación está infraestimada

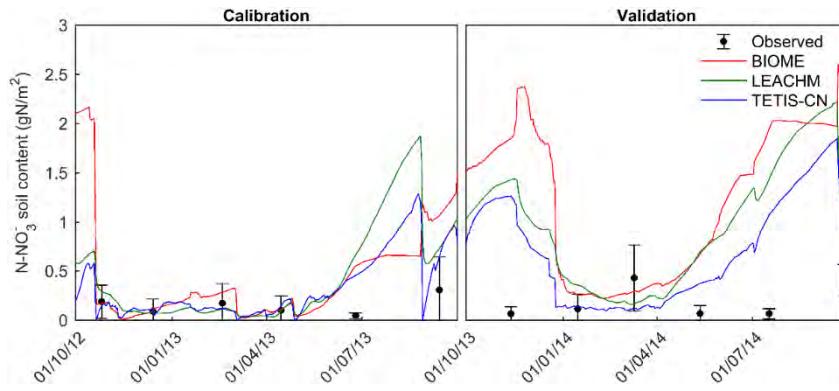
Resultados y discusión

Flujo	BIOME	LEACHM	TETIS-CN
Carbono orgánico en residuos vegetales (gC/m^2)	152.8	113.0	262.5
Respiración heterótrofa (gC/m^2)	182.9	135.5	292.2
Nitrógeno orgánico en residuos vegetales (gN/m^2)	3.3	5.2	9.1
Mineralización neta (gN/m^2)	3.8	5.8	6.9
Volatilización (gN/m^2)	0.0	0.1	0.0
Nitrificación neta (gN/m^2)	5.7	5.3	5.3
Desnitrificación (gN/m^2)	0.3	0.1	0.3
Extracción de nitrógeno (gN/m^2)	0.3	2.0	3.5
Lixiviación de nitrógeno (gN/m^2)	5.9	3.5	3.2



- BIOME presenta un porcentaje inferior de raíces en los primeros 15 cm
 - Crecimiento de la vegetación: desarrollado de raíces buscando agua en capas más profundas

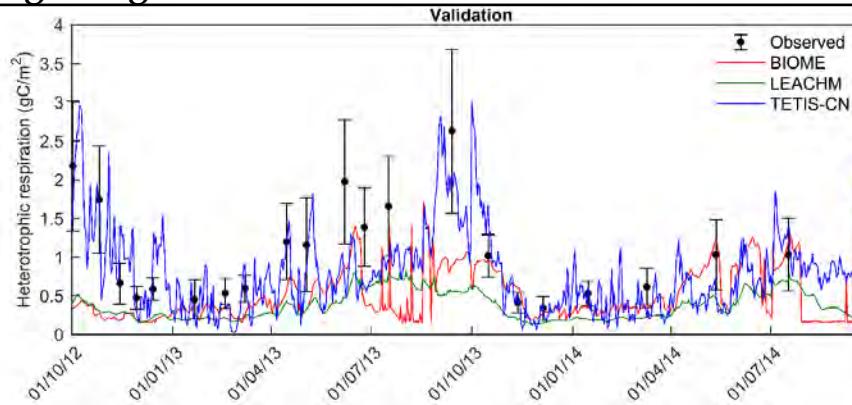
Resultados y discusión



- No se consideran todas las especies vegetales
 - *Q. faginea* y *P. halepensis*: raíces más profundas (Baquedano and Castillo, 2007)
 - *J. oxycedrus* y *J. phoenicea*: raíces poco profundas (Castillo et al., 2002; Gazol et al., 2017)
 - *J. oxycedrus* desarrolla sus raíces en los primeros 15 cm de suelo
- LEACHM y TETIS-CN consideran una extracción potencial diaria constante
 - La extracción de N es mayor durante la época de crecimiento (Limousin et al., 2009)

Resultados y discusión

Flujo	BIOME	LEACHM	TETIS-CN
Carbono orgánico en residuos vegetales (gC/m ²)	152.8	113.0	262.5
Respiración heterótrofa (gC/m ²)	182.9	135.5	292.2
Nitrógeno orgánico en residuos vegetales (gN/m ²)	3.3	5.2	9.1
Mineralización neta (gN/m ²)	3.8	5.8	6.9
Volatilización (gN/m ²)	0.0	0.1	0.0
Nitrificación neta (gN/m ²)	5.7	5.3	5.3
Desnitrificación (gN/m ²)	0.3	0.1	0.3
Extracción de nitrógeno (gN/m ²)	0.3	2.0	3.5
Lixiviación de nitrógeno (gN/m ²)	5.9	3.5	3.2



- TETIS-CN se ajusta mejor a los valores observados de respiración
 - Calibración sin variables de estado de C

Conclusiones del ecosistema natural

- La encina en climas semiáridos presenta una fuerte dependencia de los recursos subterráneos para sobrevivir:
 - Predicciones precisas → transpiración de recursos subterráneos.
- Resultados satisfactorios:
 - BIOME: Problemas de sobreparametrización sin suficiente información.
 - Proceso de calibración: Incluir variables de estado del ciclo del C.
 - Modelización:
 - Transpiración en TETIS-CN
 - Influencia VPD.
 - Crecimiento de la vegetación.
 - Contenido de NO_3^- en el suelo
 - Todas las especies vegetales existentes
 - Crecimiento de la vegetación → extracción potencial diaria variable a lo largo del año.
- TETIS-CN ha demostrado ser una herramienta adecuada para reproducir el ciclo hidrológico y los ciclos de carbono y nitrógeno a pesar de su menor número de parámetros.

El Mar Menor: un ecosistema antrópico



Modelización de los ecosistemas antrópicos

- La agricultura intensiva
 - Mayor fuente de contaminación difusa
 - Principal impacto ambiental es la contaminación de las masas de agua por:
 - Nitrógeno → produce eutrofización y contaminación de aguas subterráneas
 - Sedimentos → contribuyen a la degradación del hábitat
- Emplear modelos de nitrógeno para mejorar su sostenibilidad**
- Elevado uso de fertilizantes para aumentar la producción
 - Disponibilidad de nitrógeno mineral no condicionada por la actividad microbiana
- El ciclo de carbono puede reemplazarse por una tasa de mineralización**
- No se emplean prácticas de conservación del suelo
 - Elevadas tasas de erosión → Suelos con elevados contenidos de N
- Incluir la modelización del ciclo de sedimentos**

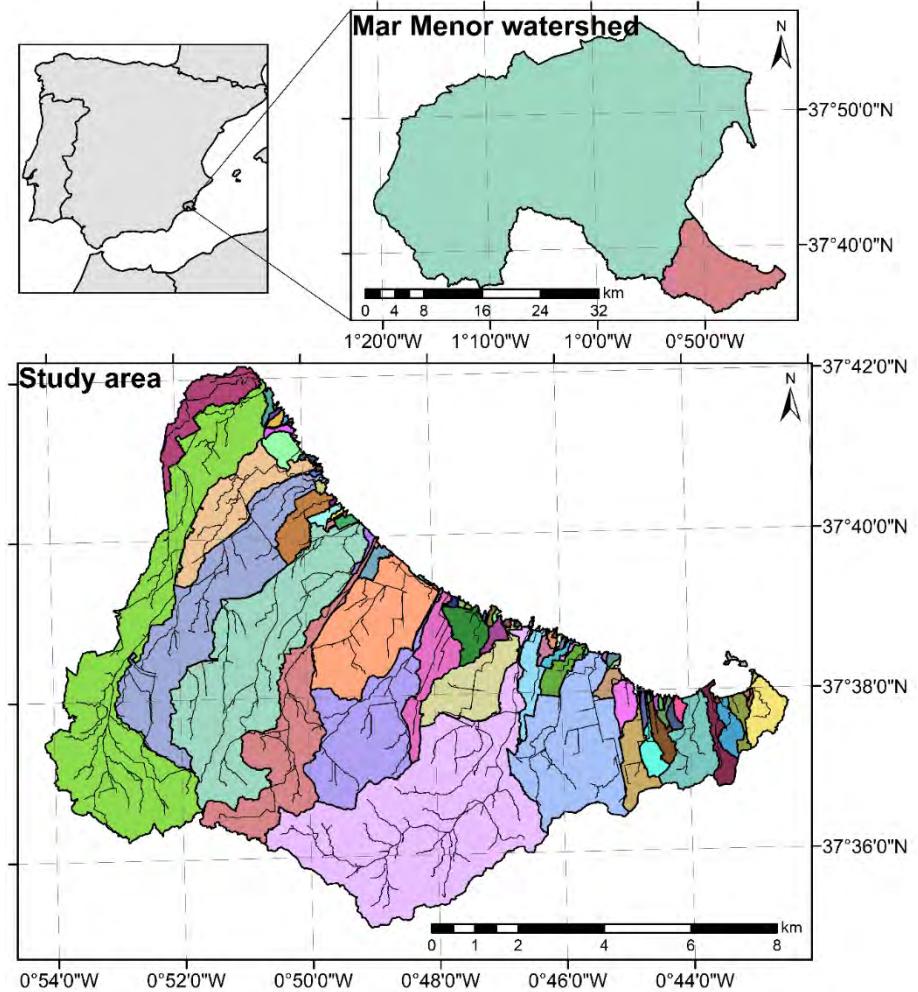
Objetivos específicos del ecosistema antrópico

Modelo de escala diaria que incluya el ciclo hidrológico y los ciclos de nitrógeno y sedimentos

- Desarrollado el modelo TETIS-N
- Implementado en las cuencas sur del Mar Menor
- Objetivos:
 - Analizar la efectividad de una serie de actuaciones a desarrollar en la zona agrícola para reducir la descarga de nitrógeno y sedimentos en la laguna
 - Servir como base para el desarrollo de planes de gestión de cuenca en zonas de similares características

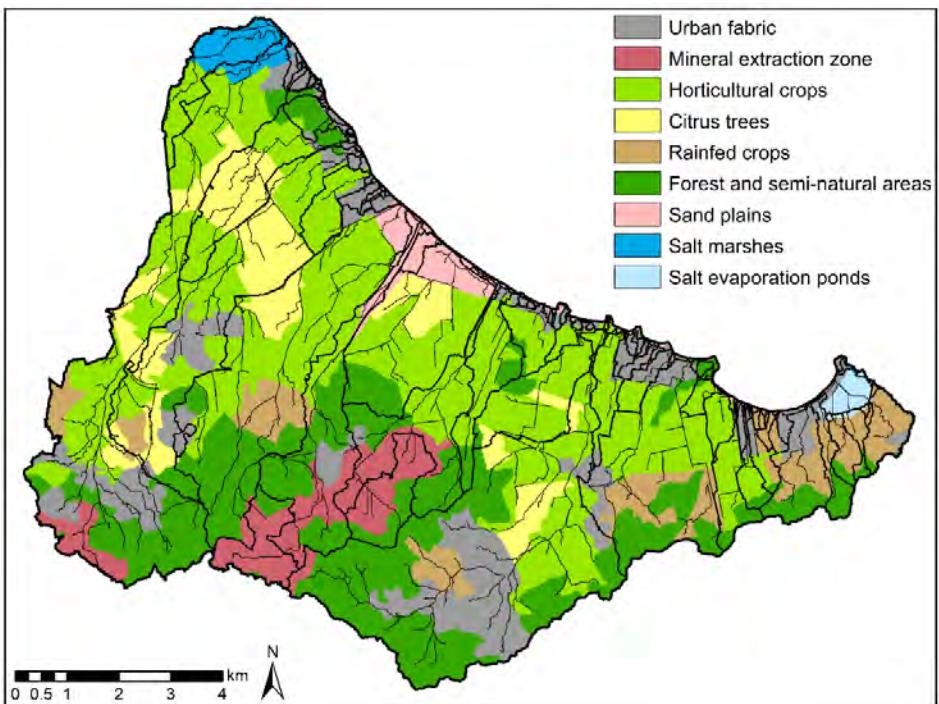
Área de estudio

- Cuencas sur del Mar Menor
 - Superficie: 100.1 km²
 - 88 cuencas y 6 cuencas endorreicas
 - 66 microcuencas costeras
 - Clima semiárido:
 - Precipitación: 291 mm/año
 - ET₀: 1061 mm/año
 - Temperatura media anual: 18.7 °C



Área de estudio

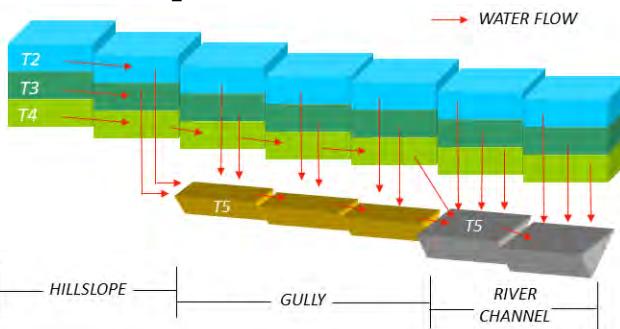
- Cuencas sur del Mar Menor
 - Superficie: 100.1 km²
 - 88 cuencas y 6 cuencas endorreicas
 - 66 microcuencas costeras
 - Clima semiárido:
 - Precipitación: 291 mm/año
 - ET₀: 1061 mm/año
 - Temperatura media anual: 18.7 °C
 - El 53.3% de la superficie se dedica a a la agricultura intensiva
 - 36.7% cultivos hortícolas
 - Brócoli, melón y lechuga
 - 9.5% cítricos
 - Las prácticas habituales son:
 - Aplicación en exceso de fertilizantes mediante fertirrigación diaria por goteo
 - No emplear prácticas de conservación del suelo



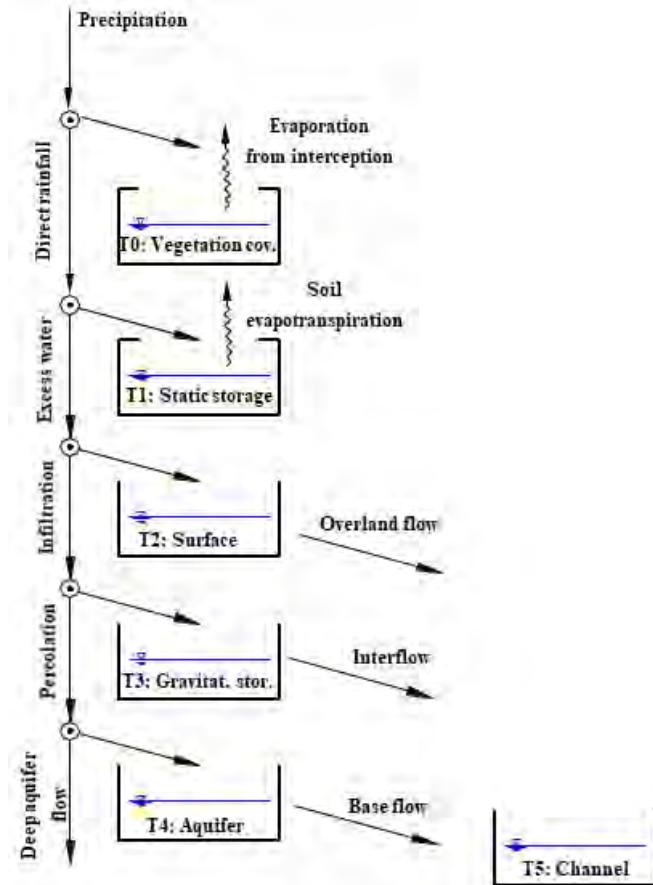
El modelo TETIS-N

• Submodelo hidrológico

- Estructura de tanques en cada celda interconectados vertical y horizontalmente
 - Ladera → 4 tanques
 - Intercepción
 - Almacenamiento estático
 - Almacenamiento en superficie
 - Almacenamiento gravitacional
 - Acuífero → 1 tanque
 - Cauce → 1 tanque



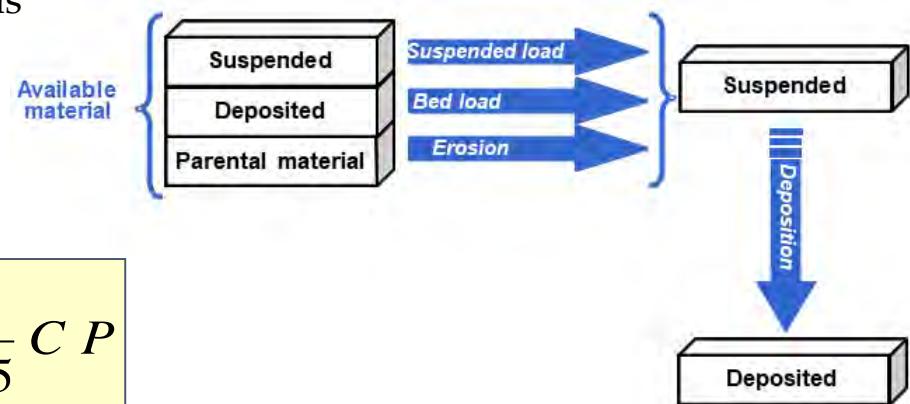
- Conexión horizontal mediante la definición de dos áreas umbrales:
 - Interflujo
 - Flujo base



El modelo TETIS-N

• Submodelo de sedimentos

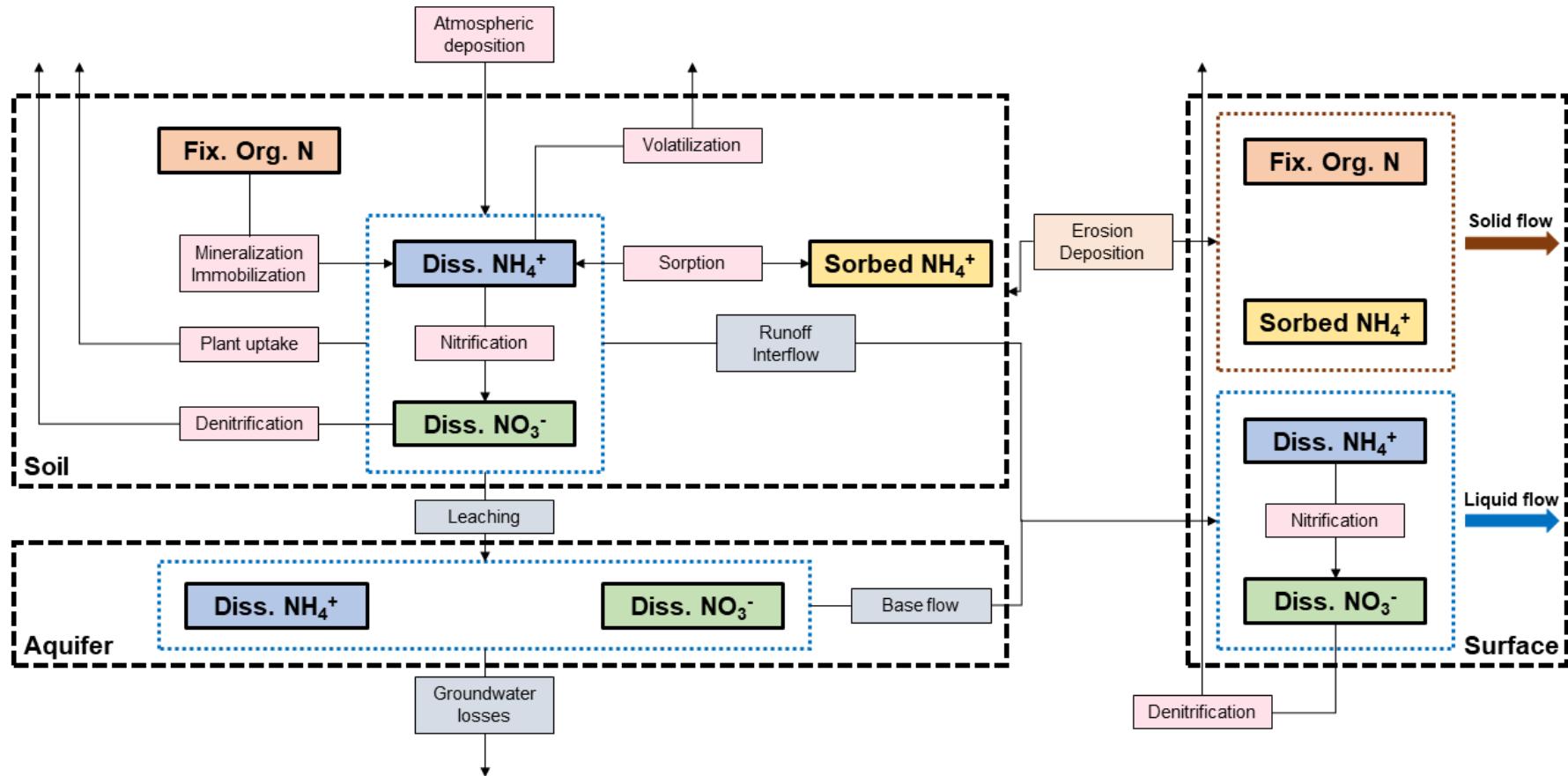
- Representado por tres tanques en cada celda:
 - Sedimentos suspendidos
 - Sedimentos depositados
 - Material parental
- Basado en un balance entre la capacidad de transporte de la corriente y la disponibilidad de sedimentos
- Capacidad de transporte en laderas calculada de acuerdo a la ecuación modificada de Kilinc-Richardson (Julien, 2010; Kilinc and Richardson, 1973)
 - Incorpora el efecto de las características del suelo, el uso del suelo y las prácticas de cultivo mediante:
 - Factor de erosión (factor K)
 - Factor de cubierta (factor C)
 - Factor de prácticas de cultivo (factor P)



$$Q_h = \frac{1}{\gamma_s} W \alpha S_o^{1.66} \left(\frac{Q}{W} \right)^{2.035} \frac{K}{0.15} C P$$

El modelo TETIS-N

- Submodelo de nitrógeno

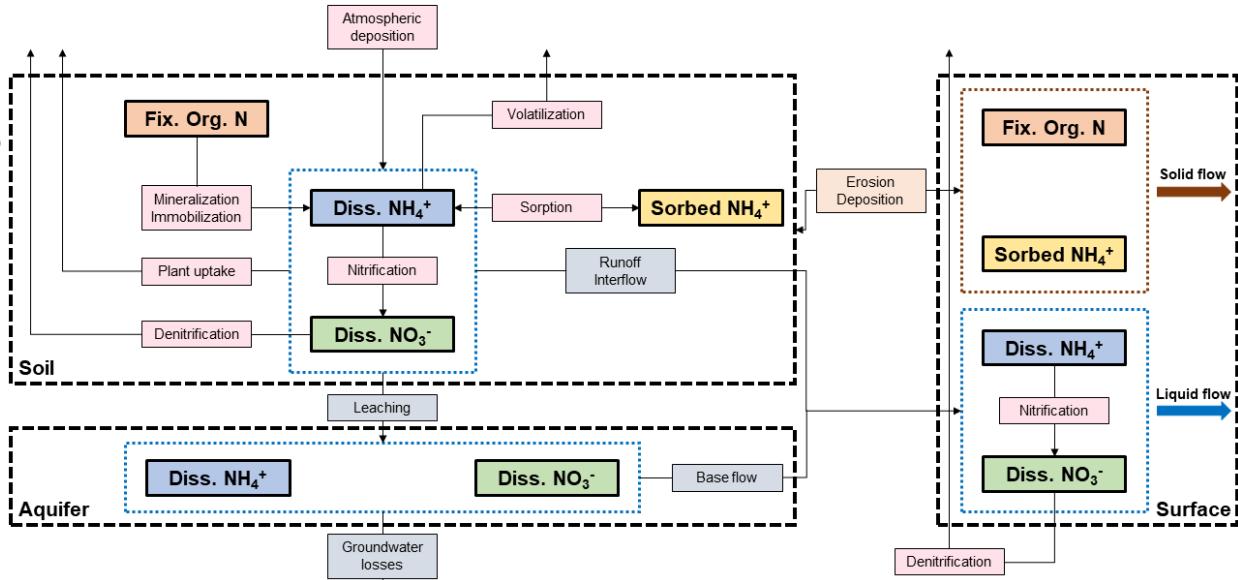


El modelo TETIS-N

• Submodelo de nitrógeno

• Suelo:

- Compartimentos:
 - Nitrógeno orgánico
 - NH_4^+ adsorbido
 - NH_4^+ disuelto
 - NO_3^-



• Cauce:

• Compartimentos:

- Nitrógeno orgánico
- NH_4^+ adsorbido

• Procesos

- NH_4^+ disuelto
- NO_3^-

• Acuífero:

• Compartimentos:

- NH_4^+ disuelto
- NO_3^-

El modelo TETIS-N

- Submodelo de crecimiento de cultivos

- Basado en el cálculo del nitrógeno crítico (Rahn et al., 2010)
 - Nitrógeno mínimo para máximo crecimiento

$$N_{crit} = a(1 + be^{-0.26W})$$

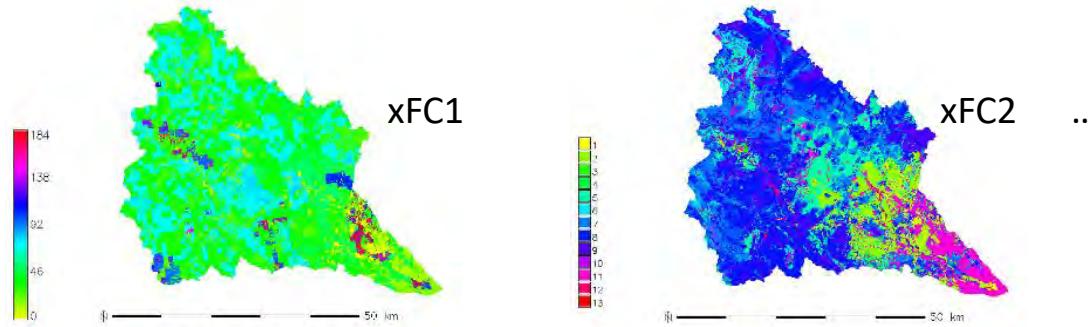
- Simula el crecimiento a partir de la variable de estado materia seca

$$\Delta W = \frac{k_2 G_N G_T G_W W}{K_1 + W}$$

- Tiene en cuenta la posible limitación por:
 - Disponibilidad de agua para transpirar
 - Temperatura del aire
 - Disponibilidad de nitrógeno

El modelo TETIS-N

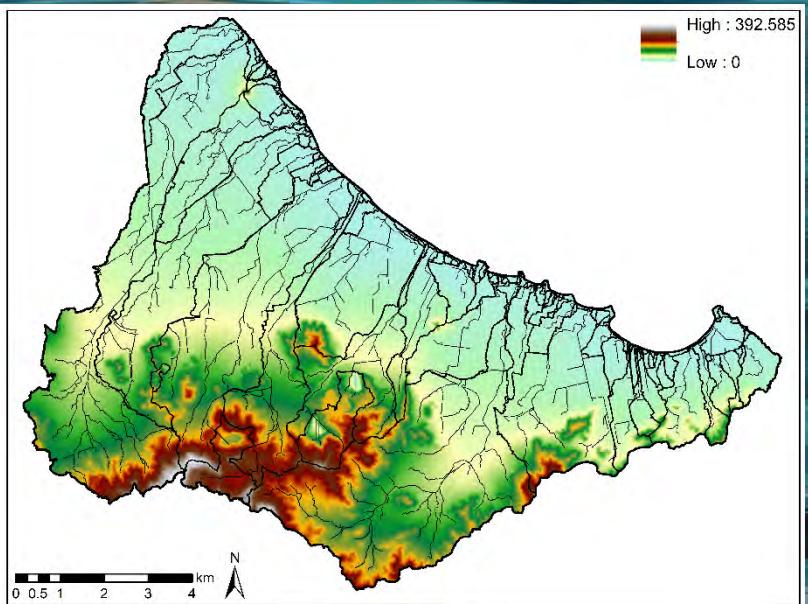
- Estructura separada de parámetros efectivos
 - Facilidad de calibración → reduce el número de parámetros a calibrar
 - Los mapas de parámetros iniciales se emplean como valores modales
 - Importancia en obtener una correcta representación espacial y no en el valor absoluto
 - Estos mapas de parámetros son corregidos con un factor corrector por mapa



Estimación inicial de parámetros

- Submodelo hidrológico:

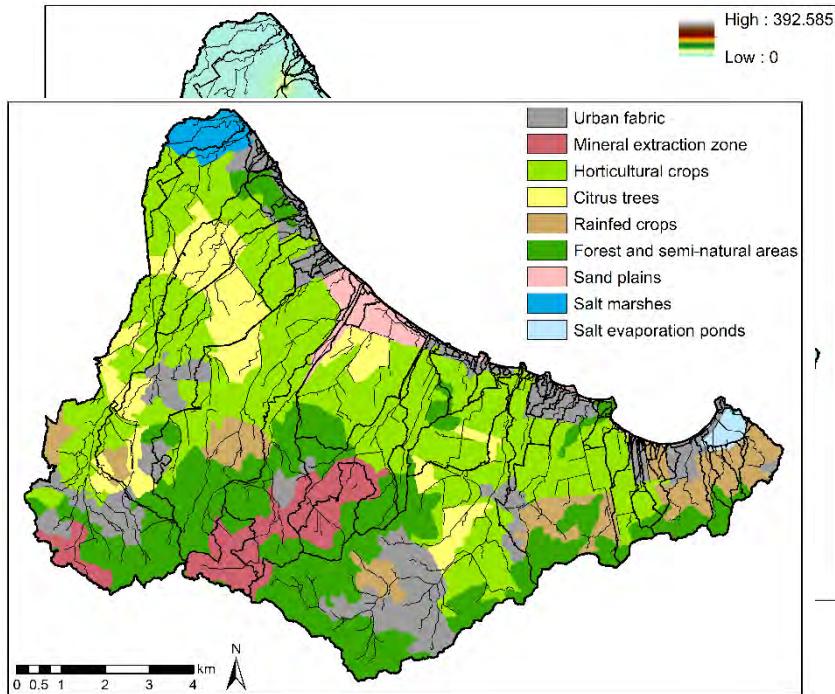
- MED (CNIG + Tragsatec)
 - 5x5 m para poder reproducir adecuadamente la red de drenaje
 - 4.003.244 celdas
- Información derivada del MED
 - Pendientes
 - Direcciones de drenaje
 - Celdas drenantes acumuladas



Estimación inicial de parámetros

- Submodelo hidrológico:

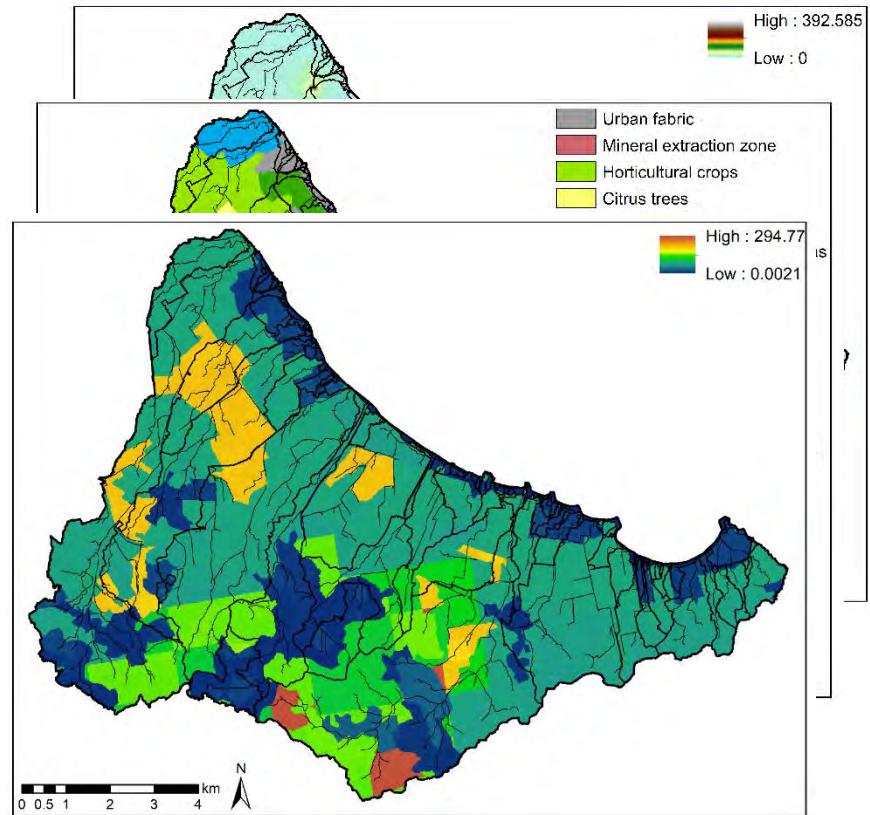
- MED (CNIG + Tragsatec)
 - 5x5 m para poder reproducir adecuadamente la red de drenaje
 - 4.003.244 celdas
- Información derivada del MED
 - Pendientes
 - Direcciones de drenaje
 - Celdas drenantes acumuladas
- Usos del suelo (CORINE, 2006)
- Distribución mensual del factor de vegetación (Allen et al., 1998)



Estimación inicial de parámetros

- Submodelo hidrológico:

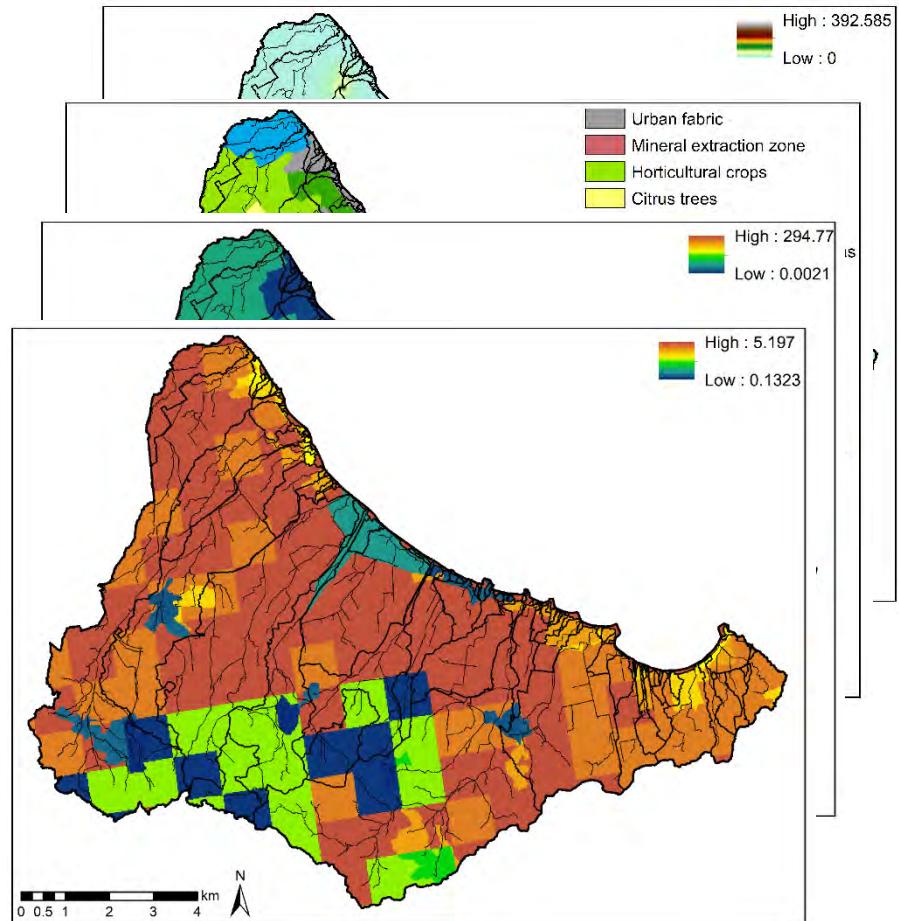
- MED (CNIG + Tragsatec)
 - 5x5 m para poder reproducir adecuadamente la red de drenaje
 - 4.003.244 celdas
- Información derivada del MED
 - Pendientes
 - Direcciones de drenaje
 - Celdas drenantes acumuladas
- Usos del suelo (CORINE, 2006)
- Distribución mensual del factor de vegetación (Allen et al., 1998)
- Almacenamiento estático máx. (ESDB)



Estimación inicial de parámetros

- Submodelo hidrológico:

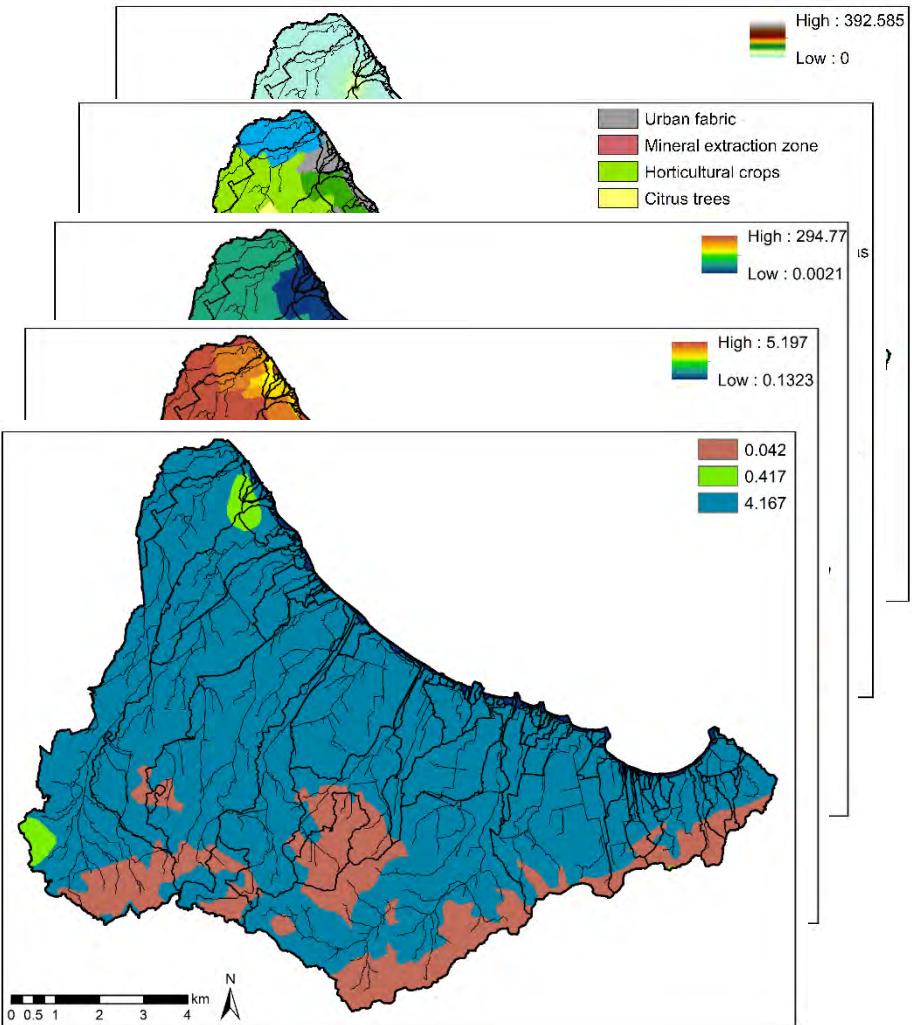
- MED (CNIG + Tragsatec)
 - 5x5 m para poder reproducir adecuadamente la red de drenaje
 - 4.003.244 celdas
- Información derivada del MED
 - Pendientes
 - Direcciones de drenaje
 - Celdas drenantes acumuladas
- Usos del suelo (CORINE, 2006)
- Distribución mensual del factor de vegetación (Allen et al., 1998)
- Almacenamiento estático máx. (ESDB)
- Capacidad de infiltración (ESDB)



Estimación inicial de parámetros

- Submodelo hidrológico:

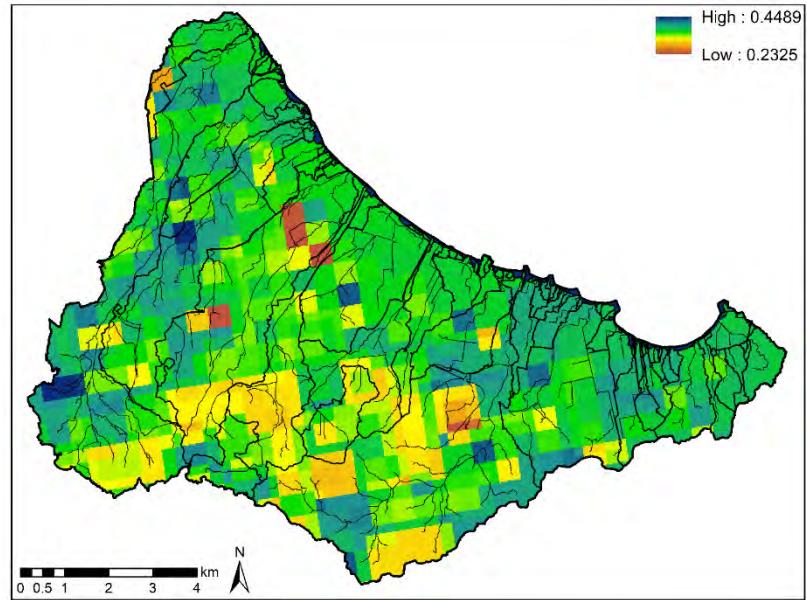
- MED (CNIG + Tragsatec)
 - 5x5 m para poder reproducir adecuadamente la red de drenaje
 - 4.003.244 celdas
- Información derivada del MED
 - Pendientes
 - Direcciones de drenaje
 - Celdas drenantes acumuladas
- Usos del suelo (CORINE, 2006)
- Distribución mensual del factor de vegetación (Allen et al., 1998)
- Almacenamiento estático máx. (ESDB)
- Capacidad de infiltración (ESDB)
- Capacidad de percolación (IGME)



Estimación inicial de parámetros

- Submodelo de sedimentos

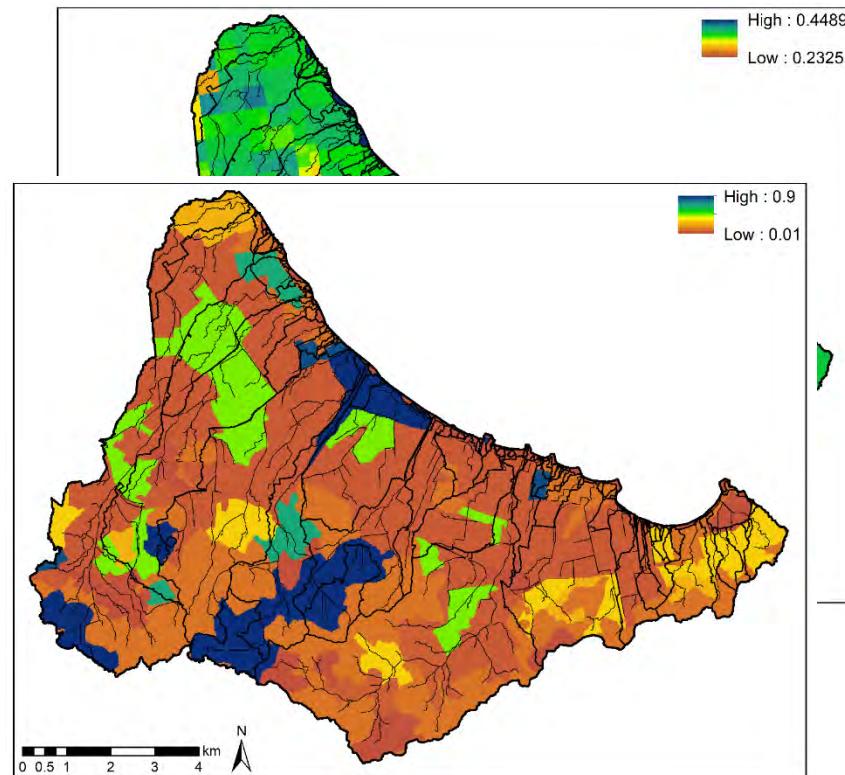
- Textura del suelo (ESDB)
 - Contenido en arena
 - Contenido en limo
 - Contenido en arcilla
- Factor de erosionabilidad (Factor K)



Estimación inicial de parámetros

- Submodelo de sedimentos

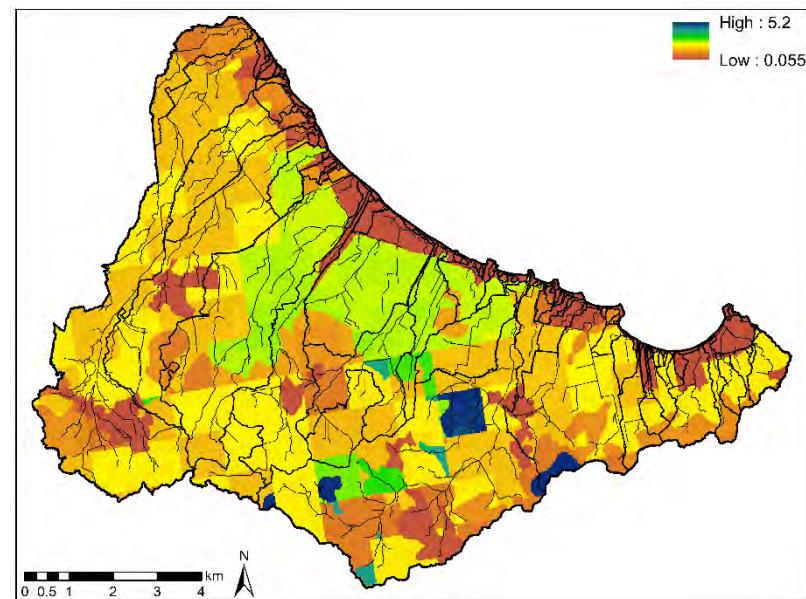
- Textura del suelo
 - Contenido en arena
 - Contenido en limo
 - Contenido en arcilla
- Factor de erosionabilidad (Factor K)
- Factor de cubierta (Factor C)
- Factor de cultivo (Factor P)
 - Toma valor 1 por no aplicarse prácticas de conservación del suelo actualmente



Estimación inicial de parámetros

- Submodelo de nitrógeno

- Contenido de nitrógeno orgánico del suelo (ESDB)
 - Profundidad efectiva del suelo (ESDB)
 - Coeficiente de distribución de NH_4^+
 - Para cada uso del suelo:
 - Distribución mensual del factor de cubierta
 - Tasa de mineralización
 - Tasa de inmovilización
 - Tasa de nitrificación
 - Tasa de desnitrificación
 - Tasa de volatilización
 - Coeficiente de difusión
 - Extracción potencial
 - Preferencia de nitrógeno
- (Fuentes diversas)



Datos de entrada

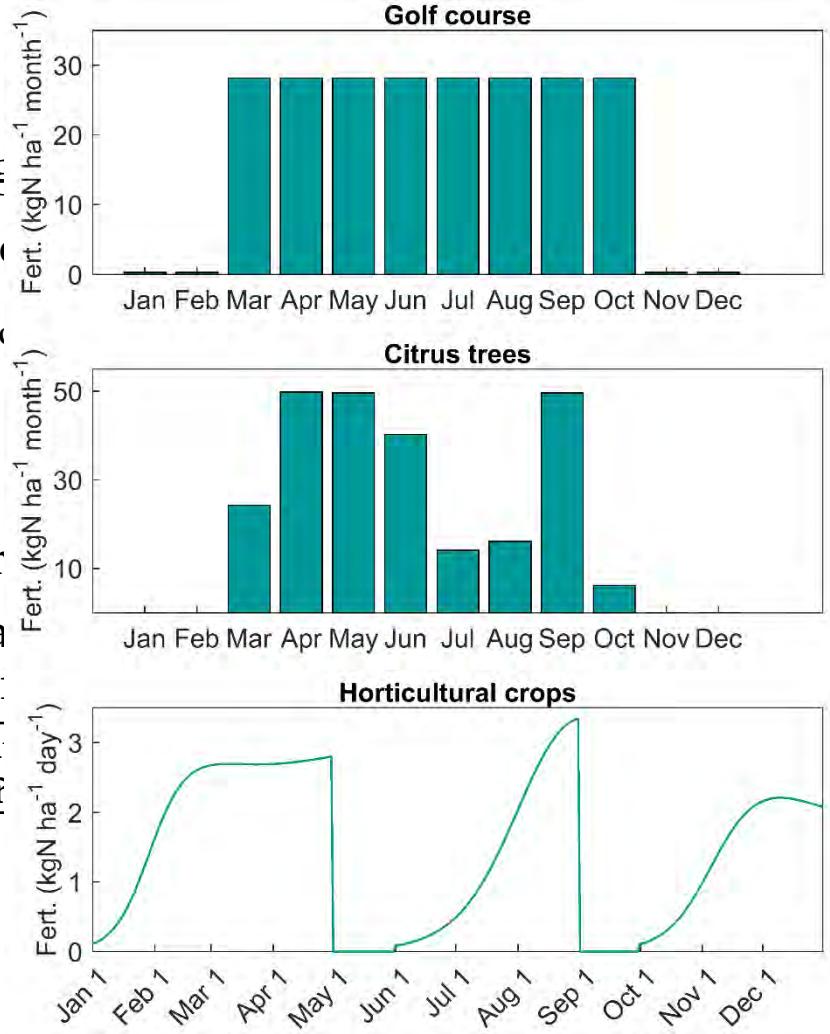
- Precipitación y temperatura:
 - 1971-2008 → Spain02 v4
 - 2009-2016 → estación localizada en Cartagena, AEMET
- Volúmenes y zonas de riego → Plan Hidrológico de Cuenca del Segura
- Deposición atmosférica → CIEMAT (García-Gómez et al., 2014)
- Dosis de fertilizantes:
 - Campo de golf → Expertos en la materia
 - Cítricos → Sistema de Información Agraria de Murcia
 - Cultivos hortícolas → Valores recomendados (Ramos and Pomares, 2010), corregidos por expertos locales para representar la situación real y considerar el contenido de nitrógeno del agua de riego

	Fertilizante (kgN/ha/año)	Plantación	Cosecha
Campo de golf	226	-	-
Cítricos	250	-	-
Hortícolas	Brócoli	250	1 enero
	Melón	130	1 junio
	Lechuga	130	1 octubre
			30 abril
			31 agosto
			31 diciembre

Datos de entrada

- Precipitación y temperatura:
 - 1971-2008 → Spain02 v4
 - 2009-2016 → estación localizada en Cartagena
- Volúmenes y zonas de riego → Plan Hidrológico
- Deposición atmosférica → CIEMAT (García et al., 2015)
- Dosis de fertilizantes:
 - Campo de golf → Expertos en la materia
 - Cítricos → Sistema de Información Agraria (SIA)
 - Cultivos hortícolas → Valores recomendados por expertos locales para representar la situación media de nitrógeno del agua de riego

	Fertilizante (kgN/ha/año)
Campo de golf	226
Cítricos	250
Hortícolas	Brócoli 250 Melón 130 Lechuga 130



Implementación del modelo TETIS-N

- Submodelo hidrológico

- Calibración:

- Ríos efímeros → escorrentía superficial y percolación
 - Estudio de inundabilidad de la Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente de la Región de Murcia → Volumen del hidrograma de $T=25$ años
 - Análisis de frecuencia de avenidas con TETIS-N
 - Periodo: 1971-2016
 - Volumen del hidrograma de 25 años de periodo de retorno

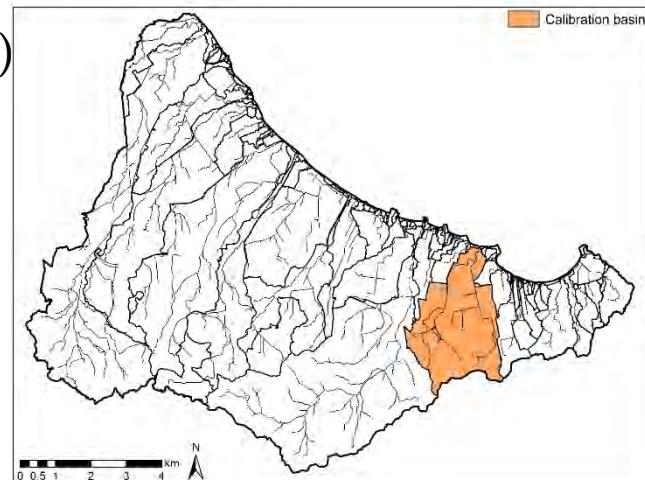
- Validación:

- Evapotranspiración de satélite (v3.3b GLEAM)

- Submodelo de sedimentos

- Calibración:

- Erosión media anual → USLE
 - Periodo: 1971-2016



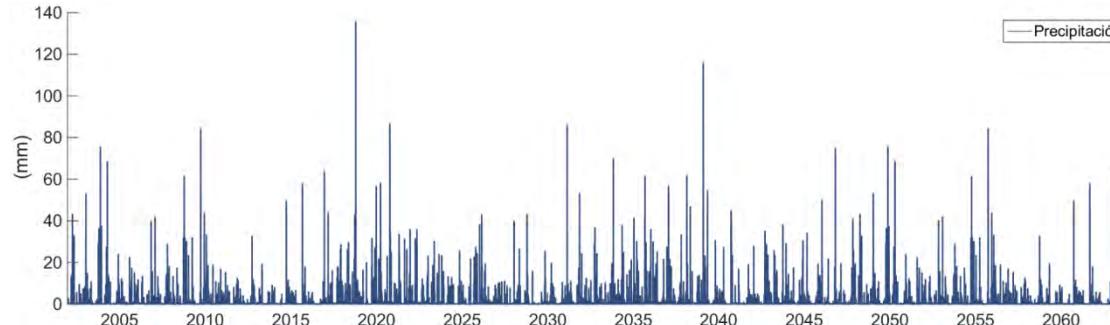
Implementación del modelo TETIS-N

- Submodelo de nitrógeno

- Calibración:
 - Demanda potencial de nitrógeno mineral según usos del suelo
 - Periodo: 2002-2011
- Validación:
 - Demandas potenciales de nitrógeno mineral
 - Periodo: 2012-2016
 - Producción de los cultivos hortícolas
 - Periodo: 2002-2016

Caracterización del escenario base

- Cálculo de los balances medios anuales (escenario base)
 - Periodo 2002-2016
 - Ampliado con los datos meteorológicos del periodo 1971-2016 asumiendo repetición de clima → 61 años



- Comparación con los escenarios propuestos
 - Mismas condiciones iniciales
 - Comparado en términos de:
 - Exportación de nitrógeno superficial
 - Lixiviación de nitrógeno
 - Producción de sedimentos
 - Producción de cultivos (sólo cultivos hortícolas)

$$\%Cambio = \frac{Actuación - Esc. \ base}{Esc. \ Base} \cdot 100$$

Actuaciones en la zona agrícola

- Medidas basadas en:
 - Decreto-Ley 1/2017, de 4 de abril, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
 - Ley 1/2018, de 7 de febrero, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- Actuaciones:
 - Cultivo en contornos (adicional)
 - Cultivo en contornos y barreras vegetales ligeras (adicional)
 - Cultivo en contornos y barreras vegetales densas (Decreto-Ley 2017 y Ley 2018)
 - Buffer costero de 100 m (Decreto-Ley 2017 y Ley 2018)
 - Buffer costero de 500 m (adicional)
 - Control de fertilizantes y rotación de tres cultivos (Decreto-Ley 2017)
 - Control de fertilizantes y rotación de dos cultivos (Ley 2018)

Actuaciones en la zona agrícola

- Cultivo en contornos (CF)

- Las operaciones de cultivo se realizan siguiendo las curvas de nivel
- Previene la erosión y el transporte de nitrógeno
- Efecto introducido a través del factor P de la USLE
 - Calculado de acuerdo con la metodología propuesta por Panagos et al. (2015):

$$P = P_c P_{vm} P_{sw}$$

Escenario	P _c	P _{vm}	P _{sw}	P
Baseline	1	1	1	1
CF	0.5	1	1	0.5
CF+GFB	0.5	0.66	1	0.33
CF+HFB	0.5	0.09	1	0.045

- Cultivo en contornos y barreras vegetales ligeras (CF+GBF)

- Instalación de estructuras vegetales lineales consistentes en vegetación herbácea perenne

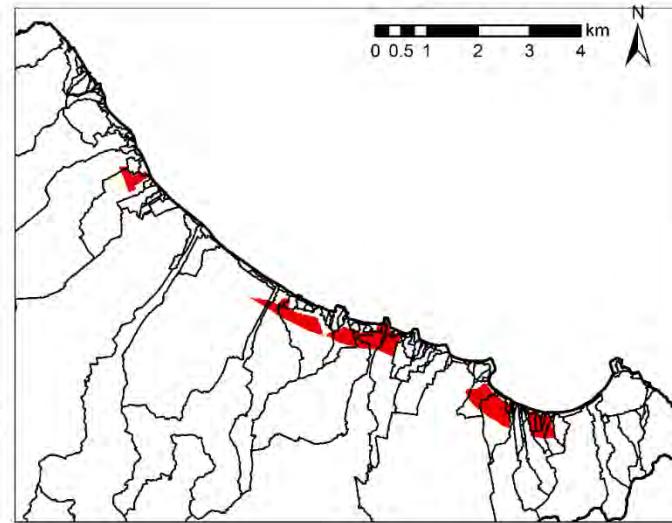
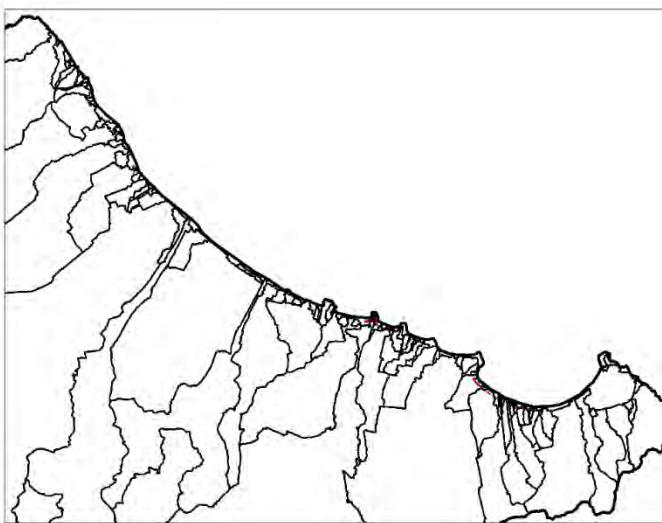
- Cultivo en contornos y barreras vegetales densas (CF+HFB)

- Instalación de estructuras vegetales lineales consistentes en vegetación herbácea perenne, arbustos y especies arbóreas

Actuaciones en la zona agrícola

- Buffer costero (CB100 y CB500)

- Prohibición de cultivos no leñosos en una franja de terreno de 100 y 500 m desde la línea de costa
- No se aplican fertilizantes, reduciendo la lixiviación y exportación de nitrógeno
- Cambio de usos del suelo



- Es una zona muy urbanizada
 - Buffer 100 m → 0.08 km²
 - Buffer 500 m → 1.53 km²

Actuaciones en la zona agrícola

- Control de fertilizantes y rotación de tres cultivos (FM)
 - Ajuste de la cantidad de fertilizantes a las necesidades estrictas de los cultivos
 - Reduce la lixiviación y exportación de nitrógeno
 - Balance suelo-planta:

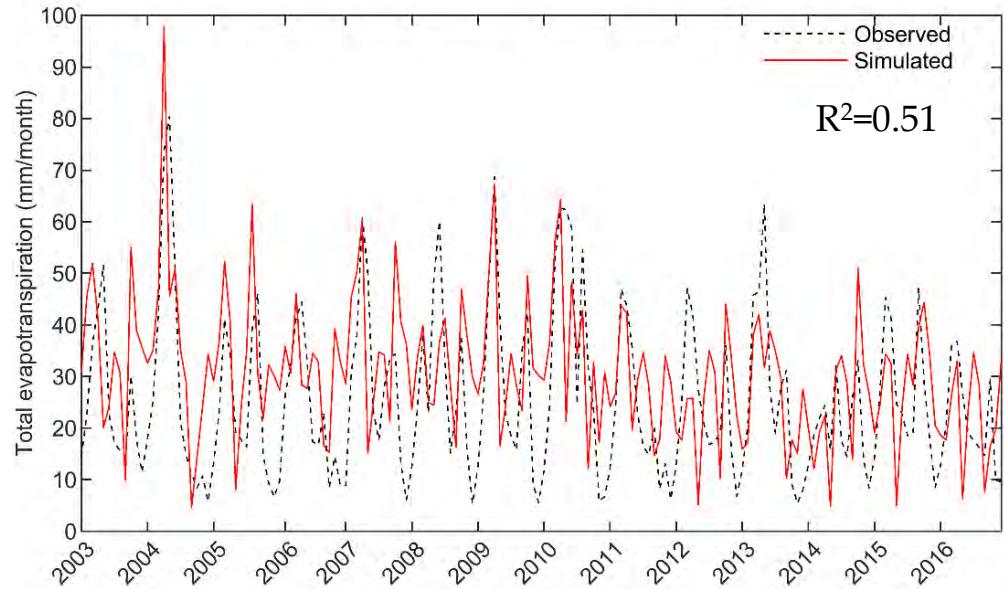
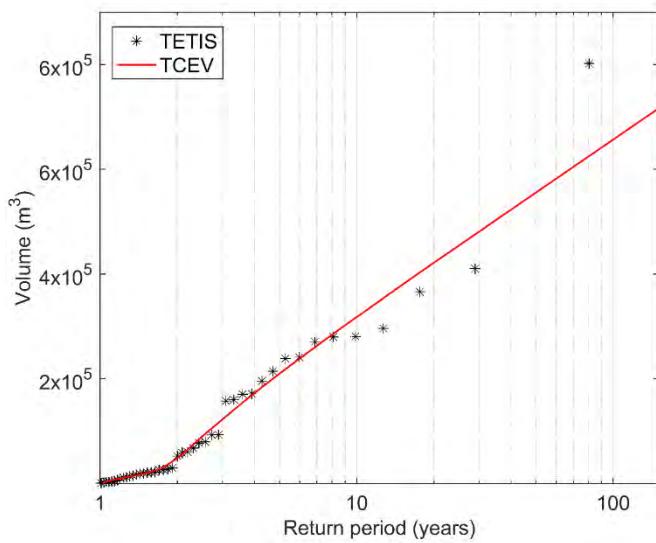
$$Fert = D_{max} - N_{ini} - N_{min} - N_{org} - N_{irr}$$

	Fertilizante ($\text{kgN ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	Escenario FM
Cítricos	250	-4.8%
Brócoli	250	-23.6%
Hortícolas	Melón	-25.4%
	Lechuga	-16.2%

- Control de fertilizantes y rotación de dos cultivos (FM+CR)
 - Cambio en el sistema productivo
 - No se considera el cultivo del melón por ser el que presenta el precio de mercado menos estable

Resultados y discusión

- Implementación del modelo
 - Submodelo hidrológico



Volumen hidrograma T=25 años

Estudio inundabilidad	457,000 m^3
TETIS-N	455,016 m^3
Error en volumen	-0.43%

Resultados y discusión

- Implementación del modelo
 - Submodelo de sedimentos

Erosión media anual	
USLE	9.29 Mg ha ⁻¹ año ⁻¹
TETIS-N	9.27 Mg ha ⁻¹ año ⁻¹
Error en volumen	-0.22%

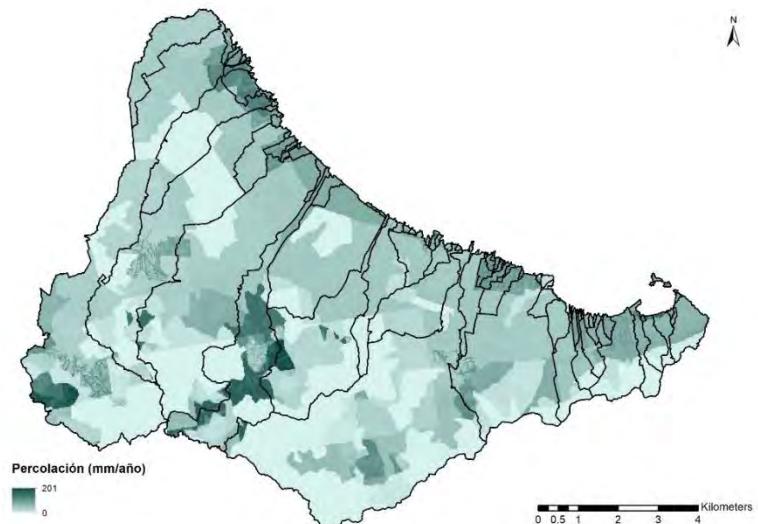
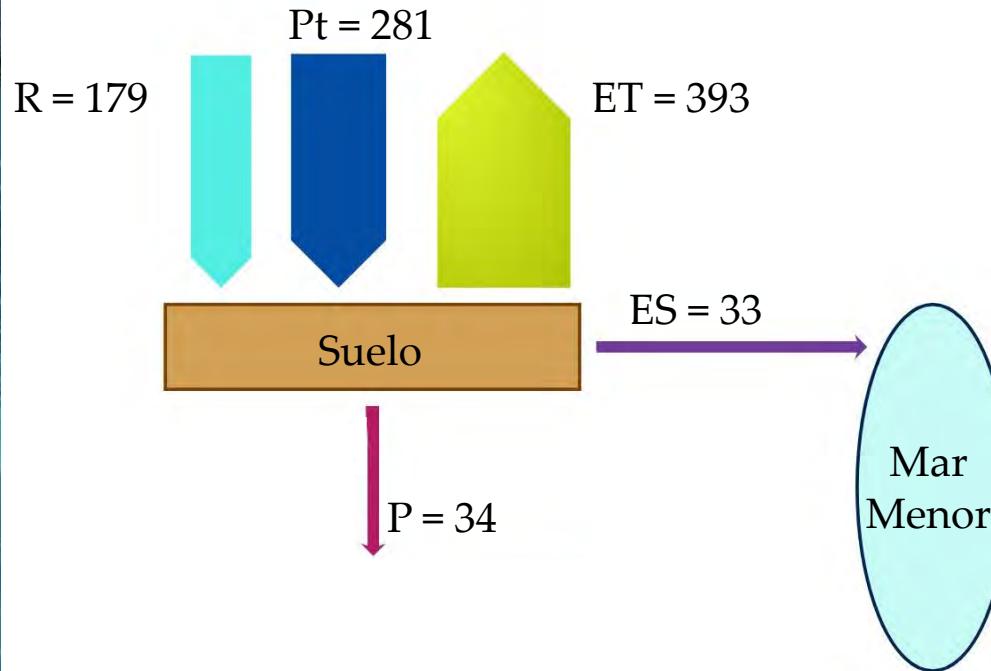
- Submodelo de nitrógeno

	Demanda pot. (kgN ha ⁻¹ año ⁻¹)	Calibración (2002-2011)	Validación (2012-2016)
Suelo urbano	47.4	-0.3%	+0.5%
Zona minera	3.0	+40.0%	+46.7%
Hortícolas	460.0	-1.0%	+0.5%
Cítricos	250.0	+10.6%	+9.4%
Cultivos de secano	60.8	-49.1%	-63.3%
Zonas forestales	21.4	-4.3%	-14.5%
Arenales	0.0	0.0%	0.0%
Marismas	10.0	+15.2%	+13.0%

	Materia seca (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Validación (2002-2016)
Brócoli	8.7	-8.6%
Melón	1.0	-4.9%
Lechuga	3.3	-5.5%

Resultados y discusión

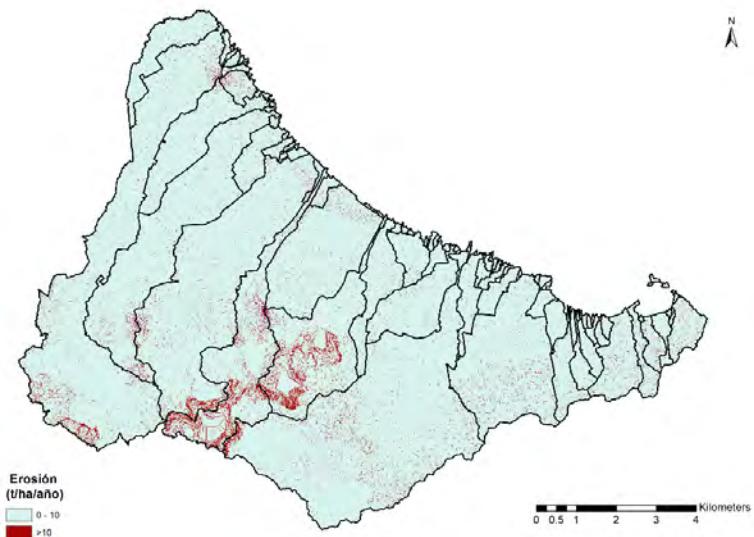
- Implementación del modelo
 - Balance hidrológico medio anual (mm)



Resultados y discusión

- Implementación del modelo
 - Balance de sedimentos medio anual

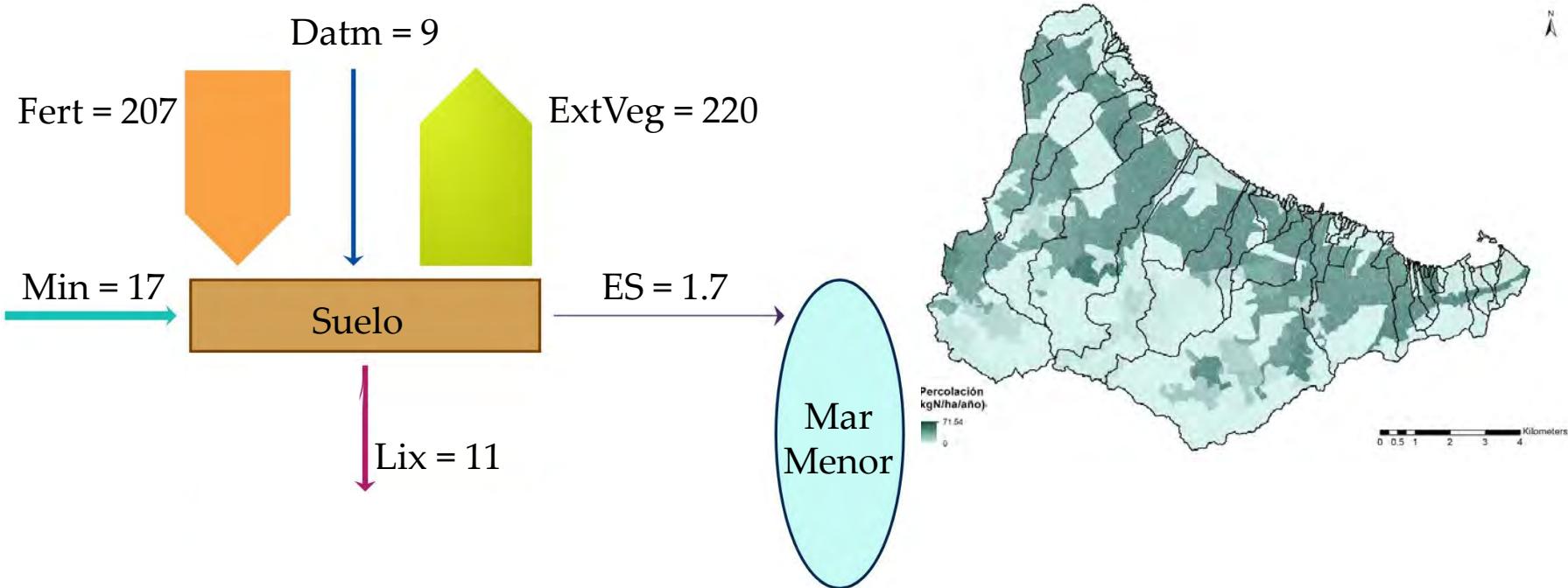
Balance de sedimentos ($Mg\ ha^{-1}$)	
Erosión	37.2
Sedimentación	30.8
Producción	6.3



- La erosión es moderadamente alta, habitual en el sureste de España
- La erosión en la zona agrícola es $2.6\ Mg\ ha^{-1}$, valor a reducir por ser suelos con elevados contenidos en nitrógeno

Resultados y discusión

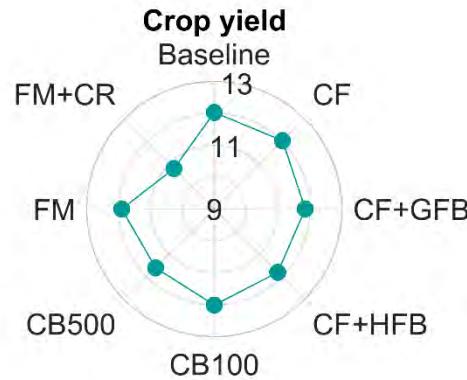
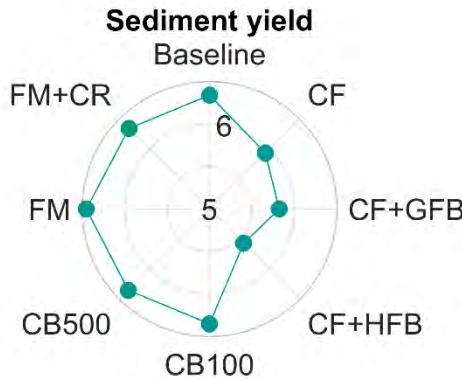
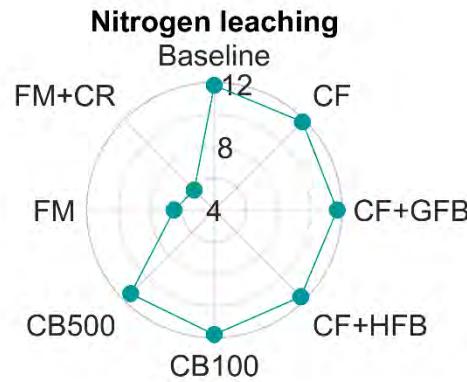
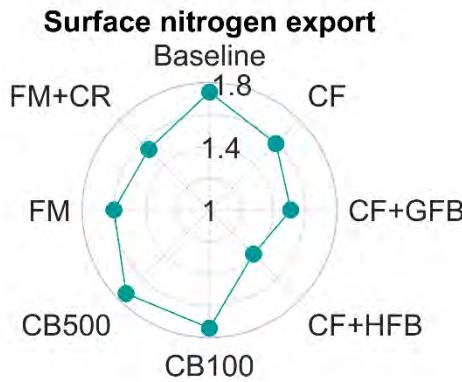
- Implementación del modelo
 - Balance de nitrógeno medio anual ($\text{kgN ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)



- García-Pintado et al. (2007): exportación media para toda la cuenca completa $1.4 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

Resultados y discusión

- Efectividad de las actuaciones

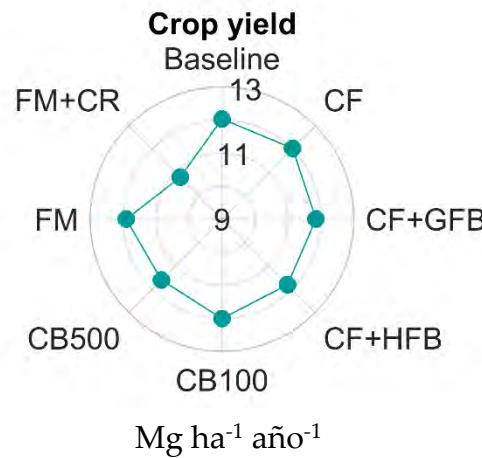
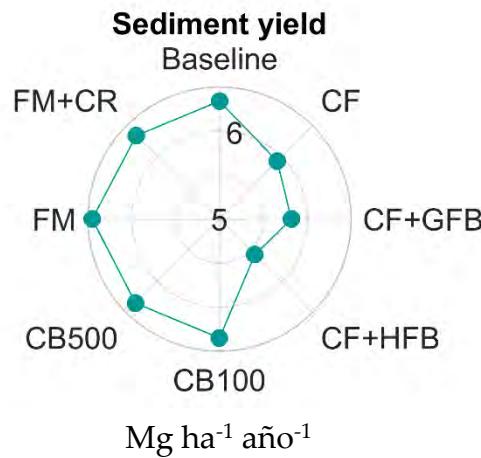


Resultados y discusión

- Efectividad de las actuaciones

- Producción de sedimentos:

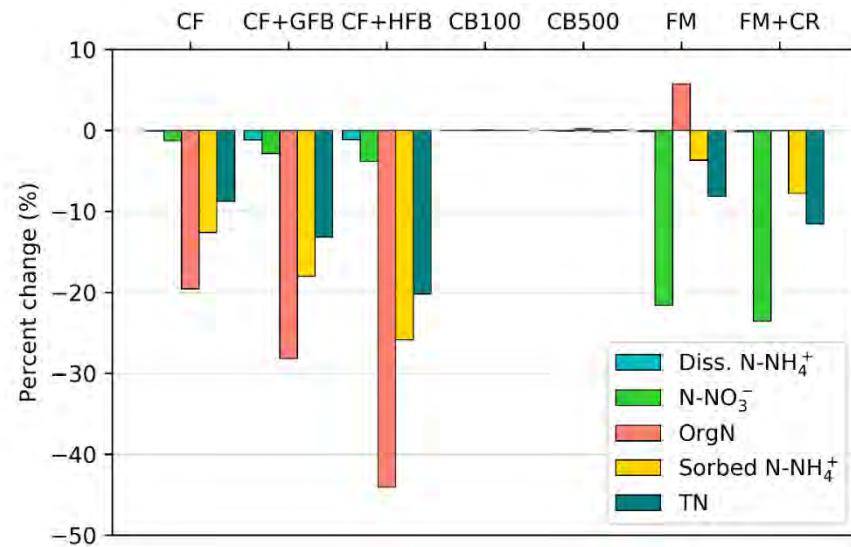
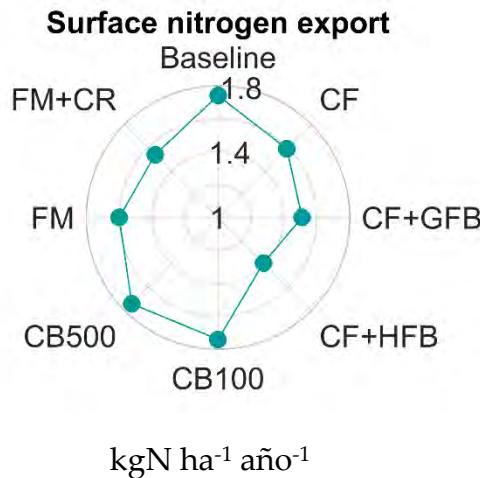
- Prácticas de conservación del suelo → Escenarios más efectivos
 - Mejores resultados en con barreras vegetales densas entre campo
 - Los agricultores pueden estar en contra por la reducción de la superficie
 - Instalación de las barreras en las márgenes de los ríos obtiene resultados similares



Resultados y discusión

- Efectividad de las actuaciones

- Exportación de nitrógeno:
 - Escenarios más efectivos:
 - Prácticas de conservación del suelo
 - Reducción de la cantidad de fertilizantes
 - Cada tipo de actuación es efectiva en reducir una forma de nitrógeno:
 - Prácticas de conservación del suelo → N adsorbido a los sedimentos (Norg y NH₄⁺)
 - Reducción de la cantidad de fertilizantes → N disuelto (NO₃⁻)

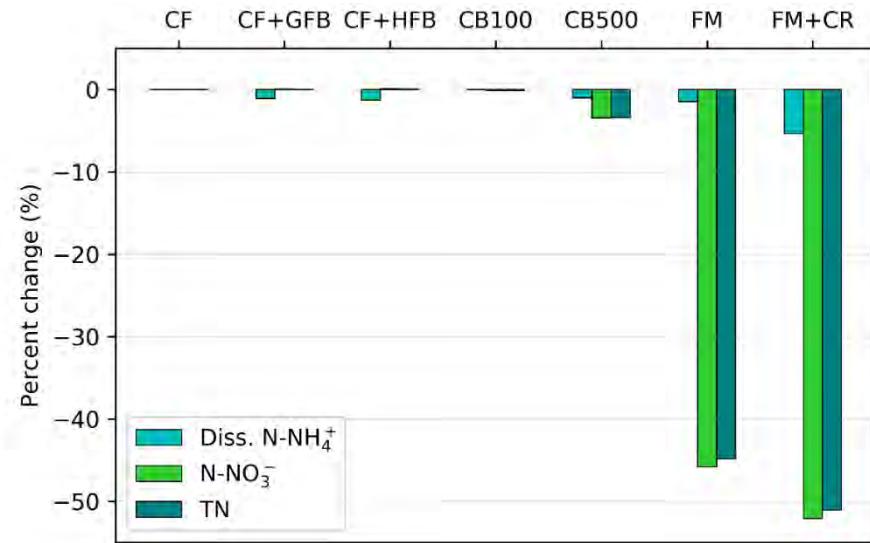
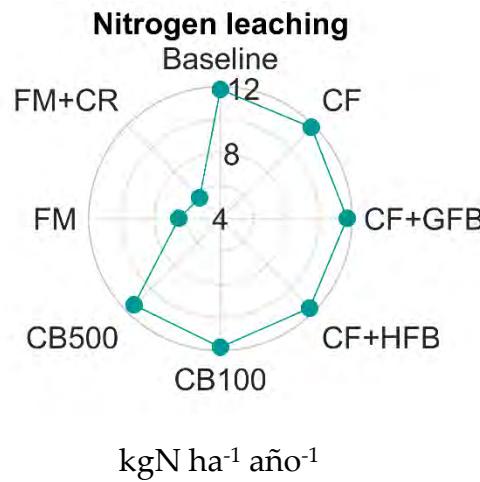


Resultados y discusión

- Efectividad de las actuaciones

- Lixiviación de nitrógeno:

- Sólo la reducción de fertilizantes es efectiva
 - Mayores reducciones de $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NH}_4^+$ protegido por sedimentos y rápidamente nitrificado
 - El cambio en el sistema productivo a dos cultivos es ligeramente más efectivo

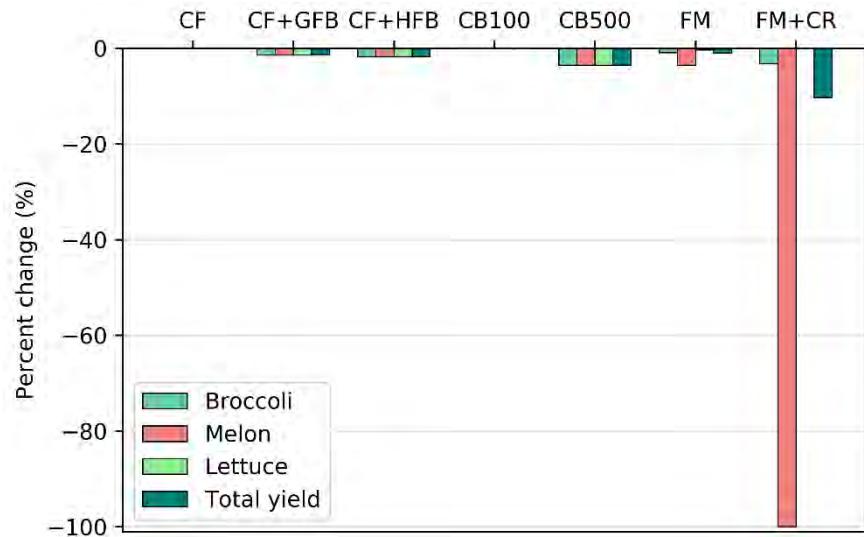
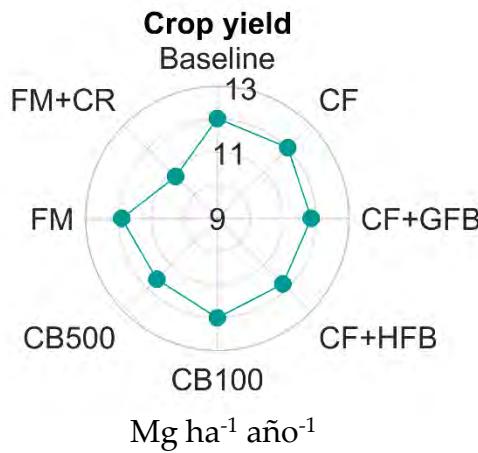


Resultados y discusión

- Efectividad de las actuaciones

- Producción hortícola:

- El cambio en el sistema productivo a dos cultivos conlleva reducciones importantes
 - El ajuste de la cantidad de fertilizantes a las necesidades de los cultivos reduce de forma significativa la exportación y lixiviación de nitrógeno sin reducir la producción
 - A partir de una cantidad de nitrógeno la producción llega a su máximo



Conclusiones del ecosistema antrópico

- Modelización:
 - A pesar de la escasez de datos observados el modelo TETIS-N ha sido capaz de representar el ciclo del agua y los ciclos de sedimentos y nitrógeno.
 - Sería necesario implementar el modelo en toda la cuenca vertiente.
- Actuaciones a llevar a cabo en la zona agrícola:
 - El cultivo en contornos combinado con la instalación de barreras vegetales densas entre campos resulta la medida más efectiva para reducir la producción de sedimentos.
 - Implantar prácticas de conservación del suelo reduce la exportación de nitrógeno asociado a los sedimentos (N_{org} y NH_4^+).
 - Reducir las cantidades de fertilizantes reduce la exportación de nitrógeno disuelto y la lixiviación (NO_3^- y en menor medida NH_4^+).
 - El cambio en el sistema productivo a dos cultivos no obtiene resultados significativamente mejores que el sistema de tres cultivos teniendo en cuenta la reducción de la producción de los cultivos.
 - Cada actuación es efectiva en reducir un cierto tipo de contaminación:
 - Cultivo en contornos con barreras vegetales densas y el ajuste de las cantidades de fertilizantes a las necesidades estrictas de los cultivos.

Conclusiones generales

- Los modelos se han convertido en una herramienta utilizada por investigadores, ingenieros y organismos públicos para mejorar la comprensión de los ecosistemas y como base para la toma de decisiones.
- Existe la necesidad de preservar los ecosistemas naturales y de mejorar la sostenibilidad de los ecosistemas antrópicos.
- No hay modelos especialmente diseñados para ser aplicados en climas semiáridos que integren las características y necesidades de modelización de los ecosistemas naturales y antrópicos bajo el principio de parsimonia.
 - En los ecosistemas naturales es necesario incluir el ciclo del carbono para obtener una modelización precisa del proceso de mineralización, principal entrada de nitrógeno mineral en estos ecosistemas.
 - En ecosistemas antrópicos la entrada de nitrógeno mineral debida al uso de fertilizantes es muy superior por lo que el ciclo del carbono puede sustituirse por una tasa de mineralización. La erosión en las zonas agrícolas suele ser elevada, siendo necesario incluir la modelización del ciclo de sedimentos.

Conclusiones generales

Cada ecosistema presenta diferentes características, comportamientos y por lo tanto necesidades de modelización



Los modelos actuales deben incluir una enfoque integrado capaz de modelizar de la forma más sencilla cada tipo de ecosistema

Líneas futuras de investigación

- Acoplar ambos modelos a escala de cuenca. Al ser TETIS un modelo distribuido sería posible emplear una conceptualización u otra dependiendo del uso del suelo.
- Acoplar el modelo TETIS-CN al actual submodelo de vegetación dinámica incluido en TETIS.
- Probar el modelo TETIS-N en una cuenca experimental.
- Emplear una calibración multivariable y multiobjetivo para la calibración de los submodelos hidrológico, de sedimentos y de nitrógeno de TETIS-N a escala de cuenca.
- Continuar recogiendo datos en la parcela experimental de la Hunde, especialmente datos relacionados con el ciclo del carbono.
- Llevar a cabo un análisis de sensibilidad de ambos modelos que puede ser útil para simplificarlos más.
- Llevar a cabo un análisis de incertidumbre de los mapas de parámetros empleados para la implementación del modelo TETIS-N.

Difusión de resultados

- 14 contribuciones a congresos nacionales e internacionales
- 1 informe científico (Gobierno de la Región de Murcia)
- 4 artículos en revistas científicas:
 - **Puertes, C.**, Bautista, I., Lidón, A., Francés, F., 2020. Best management practices scenario analysis to reduce agricultural nitrogen loads and sediment yield to the semiarid Mar Menor coastal lagoon (Spain). (Under review in Agricultural Systems).
 - **Puertes, C.**, González-Sanchis, M., Lidón, A., Bautista, I., del Campo, A.D., Lull, C., Francés, F., 2020. Improving the modelling and understanding of carbon-nitrogen-water interactions in a semiarid Mediterranean oak forest. (Under review in Ecological Modelling).
 - Echeverría, C., Ruiz-Pérez, G., **Puertes, C.**, Samaniego, L., Barrett, B., Francés, F., 2019. Assessment of remotely sensed near-surface soil moisture for distributed eco-hydrological model implementation. Water (Switzerland), 11, 2613. <https://doi.org/10.3390/w11122613>
 - **Puertes, C.**, Lidón, A., Echeverría, C., Bautista, I., González-Sanchis, M., del Campo, A.D., Francés, F., 2019. Explaining the hydrological behaviour of facultative phreatophytes using a multi-variable and multi-objective modelling approach. Journal of Hydrology, 575, 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.041>

Proyectos

- 2 Proyectos de Plan Nacional
 - TETISMED
 - TETIS Change



- 1 Proyecto Life
 - Life Resilient Forests



- 1 Contrato con Tragsatec para el Gobierno de Murcia





Exploring the possibilities of parsimonious nitrogen modelling in different ecosystems