

canvi climàtic. FLUXPYR, un exemple d'utilització de xarxes transfrontereres d'experts en l'estudi dels canvis climàtic i d'ús del sòl als Pirineus

# FLUXPYR, un exemple d'utilització de xarxes transfrontereres d'experts en l'estudi dels canvis climàtic i d'ús del sòl als Pirineus

*Fabrice Gouriveau i Maria Teresa Sebastià*

Circ dels Pessons.



48 la revista del cenma

**F**LUXPYR ([www.fluxpyr.eu](http://www.fluxpyr.eu)) és una xarxa transfronterera per a la determinació i la gestió dels fluxos i les reserves d'aigua, carboni i energia en els ecosistemes agrícoles i pastorals dels Pirineus, en un context de canvi climàtic i de canvis en l'ús del sòl. Involucra més de 50 investigadors multidisciplinaris d'Espanya, França i Andorra, i es basa en tres components relacionats: la investigació, la transferència i la formació. Combina tècniques de mesura de fluxos, tècniques de teledetecció i la modelització per estudiar els patrons i els processos ecosistèmics a diferents escales i per separar els efectes del clima i dels canvis en l'ús del sòl en els ecosistemes i els paisatges pirinencs. Contribueix al desenvolupament de tecnologies i protocols innovadors i a l'elaboració de mapes predictius de cobertura del sòl, contingut d'aigua i distribució del carboni al sòl, cobertura de neu, etc. Relaciona ciència i política, informant polítics i altres parts involucrades, i ajuda al disseny de guies per a la gestió sostenible de les pastures i els agroecosistemes i per al desenvolupament d'estratègies d'adaptació i mitigació adequades. A més, sensibilitza la societat sobre les causes i les conseqüències dels canvis globals i les maneres d'afrontar-los. El seu èxit i la seva continuïtat dependran de la seva capacitat per generar productes científics d'alta qualitat, per convertir aquests productes en elements útils per a la societat i la gestió del medi ambient, i per connectar-se amb altres xarxes i actors que ja treballen el tema del canvi climàtic a Europa.



# abstract/résumé

## FLUXPYR, an example of the use of cross-border networks of experts for the study of climate and land-use changes in the Pyrenees

FLUXPYR ([www.fluxpyr.eu](http://www.fluxpyr.eu)) is a research network for the determination and management of water, carbon and energy fluxes in agricultural and grassland ecosystems in the Pyrenees in a context of climate and land use changes. It involves more than 50 multidisciplinary researchers from Spain, France and Andorra and is based on three related components: research, transfer and training. It combines flux measurement and remote sensing techniques as well as modelling to study ecosystem patterns and processes on different scales and to disentangle the effects of weather, climate and land use changes on Pyrenean ecosystems and landscapes. It contributes to the development of innovative technologies and protocols, and to the elaboration of meteorological models and predictive maps of land cover, water content and carbon distribution and snow cover. It links science and policy by informing policy makers and stakeholders and helps with the establishment of guidelines for the sustainable management of grasslands and other agroecosystems and the development of suitable mitigation and adaptation strategies. FLUXPYR also raises awareness among citizens on the causes and consequences of global changes, and ways to cope with them. The success and future of FLUXPYR will depend on its capacity to generate high quality scientific products, to translate those products into useful tools for society and the management of the environment, and to connect itself to other networks and actors which are already working on climate change issues in Europe.

## FLUXPYR, un exemple d'utilisation de réseaux transfrontaliers d'experts pour l'étude des changements climatique et d'utilisation du sol dans les Pyrénées

**F** LUXPYR ([www.fluxpyr.eu](http://www.fluxpyr.eu)) est un réseau transfrontalier pour la détermination et la gestion des flux et réserves d'eau, carbone et énergie dans les écosystèmes agricoles et pastoraux des Pyrénées, dans un contexte de changement climatique et changements d'utilisation du sol. Il implique plus de 50 chercheurs pluridisciplinaires de France, Espagne et Andorre, et est basé sur trois composantes étroitement liées que sont la recherche, le transfert et la formation. Il combine des techniques de mesures de flux, techniques de télédétection et la modélisation pour étudier les patrons et processus écosystémiques à différentes échelles et pour séparer les effets du climat et changements d'utilisation du sol sur les écosystèmes et paysages Pyrénéens. Il contribue au développement de technologies et à l'élaboration de protocoles innovants et cartes prédictives de la couverture et contenu en eau du sol, distribution du carbone du sol, couverture neigeuse, etc. Il relie science et politique en informant les politiciens et acteurs locaux impliqués, et propose des recommandations pour la gestion durable des pâtures et agroécosystèmes, et pour le développement de stratégies d'adaptation et atténuation adaptées. De plus, il sensibilise enfin la société sur les causes et conséquences des changements globaux et les manières d'y faire face. Son succès et sa pérennisation dépendront de sa capacité à générer des produits scientifiques de haute qualité et à les traduire en éléments utiles pour la société et la gestion de l'environnement, ainsi que de sa capacité à se connecter avec les autres réseaux et acteurs qui travaillent déjà sur le thème du changement climatique en Europe.

## Context

Les conseqüències dels canvis globals, incloent-hi els canvis climàtics i els canvis en la utilització del sòl, són una preocupació real de les nostres societats. Des del 1950, les concentracions atmosfèriques dels gasos amb efecte d'hivernacle han pujat de manera notable, de 280 ppm (parts per milió) a més de 380 ppm en el cas del CO<sub>2</sub>, i de 288 a 319 ppb (parts per bilió) el N<sub>2</sub>O, per exemple (IPCC, 2007). Els estudis científics confirmen l'origen antropogènic d'aquests increments, deguts principalment al consum d'energia fòssil i a alguns canvis en l'ús del sòl, com ara la desforestació, i adverteixen que els impactes seran més perjudicials que benèfics (IPCC, 2007).

Els canvis climàtics i en l'ús del sòl influeixen de manera dràstica les dinàmiques, les funcions i la productivitat dels ecosistemes, els cicles biogeoquímics i els paisatges. Comporten canvis en la freqüència, la intensitat i la durada dels esdeveniments climàtics extrems, canvis en patrons de precipitació i sequeres, augment del nivell del mar, reducció de l'àrea coberta per les glaceres, etc. Això contribueix a la pèrdua o al desplaçament d'espècies animals i vegetals, a l'aparició de canvis en la seva fenologia i, generalment, a una alteració dels béns i serveis que els ecosistemes proporcionen a les societats humanes, com ara els aliments, l'aigua potable i la biodiversitat (Walker and Steffen, 1996; IPCC, 2007).

Les muntanyes i els seus habitants són particularment sensibles a aquests canvis i són els primers a rebre'n els impactes (Beniston, 1994 i 2003; IPCC, 2007). A més d'impactes ecològics i hidrològics, aquests canvis tenen repercussions socioeconòmiques importants, com ara la disminució de la productivitat agrícola i de la disponibilitat d'aigua a l'estiu, els impactes sobre l'activitat turística i la davallada del potencial hidroelèctric (MEA, 2005; IPCC, 2007). Concretament, als Pirineus es va registrar un escalfament

de 1,1 °C des de l'any 1900, una migració de les espècies vegetals d'uns 3 metres cada any entre el 1971 i el 1993, una anticipació de les veremes d'uns 15 dies a la zona de Banyuls de la Marenda (Pirineus Orientals), una disminució del nombre de dies de neu entre el 1971 i el 2008 i una reducció de la superfície de glaceres des del 1850, del 85% al costat francès i del 65% a l'espanyol (ARPE, 2009).

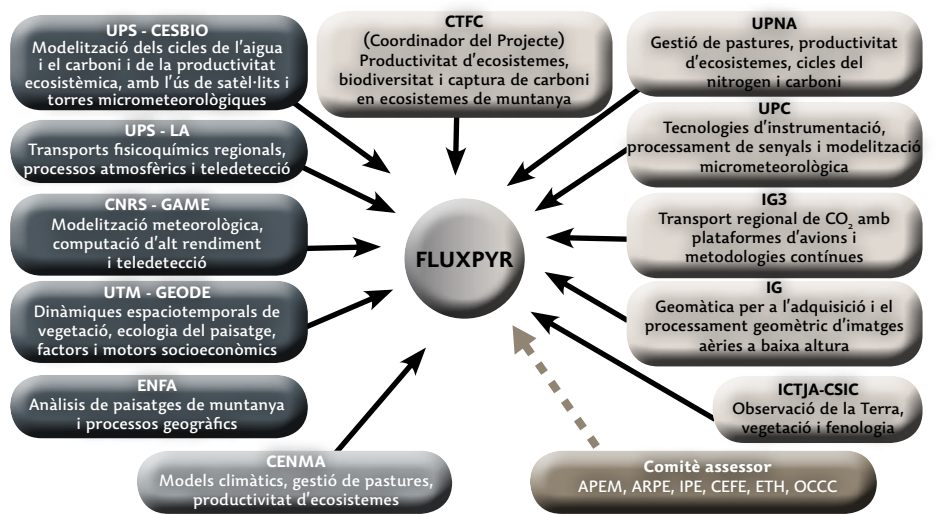
Cal intensificar els estudis dels ecosistemes pirinencs per tal de millorar el coneixement sobre les seves dinàmiques i avaluar les conseqüències del canvi climàtic. Això representa un pas important per al desenvolupament d'estratègies d'adaptació i mitigació rellevants per a les nostres societats (Cox *et al.*, 2000; Canadell *et al.*, 2007). A més, la complexitat dels canvis climàtics i humans que estem patint i de les seves conseqüències són tan importants que es requereixen sens dubte accions conjuntes i estudis pluridisciplinaris i transdisciplinaris a diferents escales espacials i temporals.

Gràcies al suport de la Unió Europea mitjançant el programa Interreg IV

A - POCTEFA, de la Generalitat de Catalunya i de la Regió Migdia Pirineus, va néixer, l'any 2009, el projecte de xarxa transfronterera FLUXPYR. El principal objectiu d'aquest article és presentar FLUXPYR, la seva organització i els seus objectius, la metodologia utilitzada i algunes de les seves aplicacions i repercussions concretes.

## Presentació del projecte FLUXPYR

FLUXPYR és una xarxa transfronterera d'instruments i experts que contribueixen a la determinació i la gestió dels fluxos i les reserves d'aigua, carboni i energia en els ecosistemes agrícoles i pastorals dels Pirineus. Hi col·laboren una quinzena d'institucions d'Espanya, França i Andorra, amb més de 50 investigadors multidisciplinaris, dels camps de la física, la química, l'agronomia, l'ecologia, la història, la geografia, etc. Els participants i la seva contribució es representen a la figura 1.



**Figura 1.** Els socis FLUXPYR i la seva contribució a la xarxa.

Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC, coordinador); Institut Català de Ciències del Clima (IC3); Institut de Geomàtica (IG); Institut Jaime Almera - Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IJA-CSIC); Universitat Politècnica de Catalunya - Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona (UPC-EUETIB); Universidad Pública de Navarra - Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria (UPNA); Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya d'Andorra (CENMA); Université Toulouse III Paul Sabatier (UPS) - Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO); UPS - Laboratoire d'Aérodynamique (LA); Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS-GAME); Météo-France; École Nationale de Formation Agronomique (ENFA); Université Toulouse II Le Mirail (UTM) - Laboratoire Géographie de l'Environnement (GEODE).

El fet de posar en xarxa, a través de FLUXPYR, institucions científiques i educatives reconegudes representa una força necessària per a la instrumentalització de les estacions de recerca, la transmissió de dades, coneixements i experiències entre institucions o la formació de personal. Assegura també l'enllaç i el flux d'informació entre investigadors, actors locals, polítics i la societat en general, i facilita la transposició de descobriments científics en aplicacions ambientals i socioeconòmiques de gran rellevància i el desenvolupament d'estratègies d'adaptació i mitigació sostenibles.

Els principals objectius de FLUXPYR són:

1) Desenvolupar una xarxa d'experts i infraestructures per determinar i gestionar els fluxos d'aigua, carboni i energia en ecosistemes agrícoles i pastorals dels Pirineus, al llarg de gradients altitudinals i climàtics.

2) Combinar i integrar mesures de fluxos, dades meteorològiques, teledetecció i modelització per avaluar els impactes dels canvis climàtics i d'ús del sòl en els agroecosistemes i paisatges i per entendre millor els processos responsables d'aquests impactes i les retroaccions entre el sòl i l'atmosfera.

3) Produir tecnologies i protocols innovadors, bases de dades, models i mapes predictius de cobertura del sòl, productivitat ecosistèmica, distribució del carboni, cobertura de neu i riscos d'allaus, etc.

4) Intercanviar coneixements, eines i experiència a escala regional i internacional, i contribuir a la formació d'estudiants i investigadors.

5) Enfortir l'enllaç entre ciència, política i desenvolupament socioeconòmic, per proposar estratègies de mitigació i d'adaptació específiques, i orientar els actors locals per a la gestió sostenible dels recursos naturals.

6) Conscienciar els ciutadans de les causes i les conseqüències dels canvis globals, i de les maneres d'enfrontar-s'hi.

## Metodologia, activitats i aplicacions

### Zona d'estudi

Els estudis es desenvolupen a tots dos costats dels Pirineus (entre 41° N i 44° N de latitud, 1° E i 2° W de longitud), però majorment a la zona central i oriental del massís, entre Tolosa i Barcelona, a les regions de Migdia-Pirineus, Llenguadoc-Rosselló, Catalunya i Navarra, i al Principat d'Andorra.

### Activitats de FLUXPYR

Per assolir els seus objectius, FLUXPYR integra activitats de recerca, transferència i formació. Combina estudis ecosistèmics, atmosfèrics i satel·litals, i exercicis de modelització per caracteritzar i interpretar les dinàmiques espaciotemporals dels fluxos de carboni, aigua i energia i els canvis en els ecosistemes a diferents escales, des de l'escala local (p. e., una parcel·la) fins a l'escala regional (figura 2).

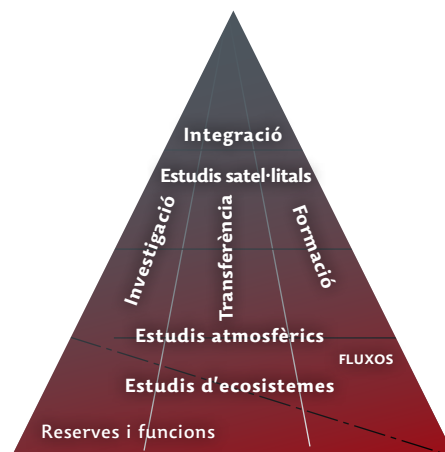


Figura 2. Marc conceptual FLUXPYR: integració d'estudis ecosistèmics, atmosfèrics i satel·litals amb activitats de transferència i formació.

Les activitats de la xarxa s'organitzen en cinc grups de treball (WG): WG3a, 3b, 4a, 4b i 5:

● El WG3a, «Funcions i reserves ecosistèmiques», investiga la productivitat de les pastures i els cultius, la biodiversitat dels ecosistemes, les ca-

racterístiques del sòl i els processos que controlen els cicles biogeoquímics.

● El WG3b, «Fluxos ecosistèmics», assegura la instrumentació d'estacions micrometeorològiques i hidrològiques en pastures i cultius, a diferents altituds, per avaluar els fluxos de carboni, aigua i energia entre el sòl i l'atmosfera, i els canvis en l'albedo de la Terra. Entre d'altres, s'utilitza la tècnica de fluxos turbulents (*eddy covariance*) o es prenen mostres d'aire amb flascons pressuritzats. Com a resultat, es calculen balanços de gasos amb efecte d'hivernacle (p. e. per identificar fonts i embornals de carboni) a escala local i regional.

● El WG4a, «Estudis atmosfèrics», estudia els fluxos i transports de carboni, aigua i energia a escala regional, mitjançant la utilització d'avions equipats per prendre mostres d'aire al llarg de transsectes (entre 300 m i 7.500 m d'altitud) o amb l'ajuda de models.

● El WG4b, «Estudis d'imatges aèries i satel·litals», s'encarrega de recollir i analitzar imatges dels Pirineus obtingudes per teledetecció (amb satèl·lits o avions), per al seguiment de la vegetació i de la cobertura de neu o l'estimació de l'albedo.

● Finalment, el WG5, «Difusió», assegura la comunicació del projecte, la difusió dels resultats, l'organització de tallers i conferències, les traduc-



Foto 1. Torre micrometeorològica FLUXPYR a Catalunya per a la mesura en continu dels fluxos de carboni, aigua i energia entre el sòl i l'atmosfera, en una parcel·la agrícola: l'anemòmetre, l'analitzador infraroig de CO<sub>2</sub> i vapor d'aigua, el pluviòmetre i el radiòmetre són alguns dels instruments que utilitza.



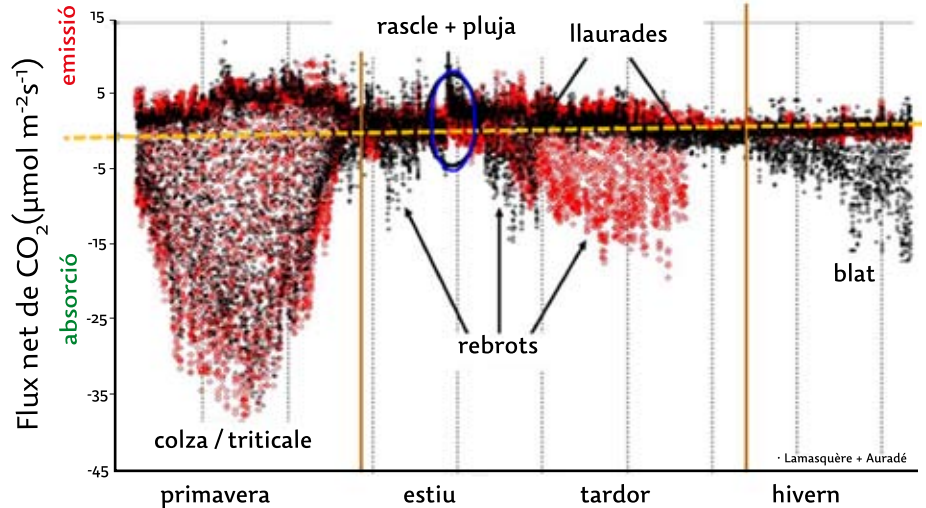
**Foto 2.** Mesures de les emissions de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O i CH<sub>4</sub> amb un aparell fotoacústic en un camp agrícola amb diferents tractaments de diversitat i grups funcionals vegetals. Les taxes d'emissions s'acceleren després de la irrigació del camp, i quan la temperatura és més elevada.

cions dels documents, etc. A més, impulsa la creació d'una agenda dels actors socioeconòmics i institucionals interessats pel canvi climàtic i de formacions acadèmiques relacionades amb aquest tema.

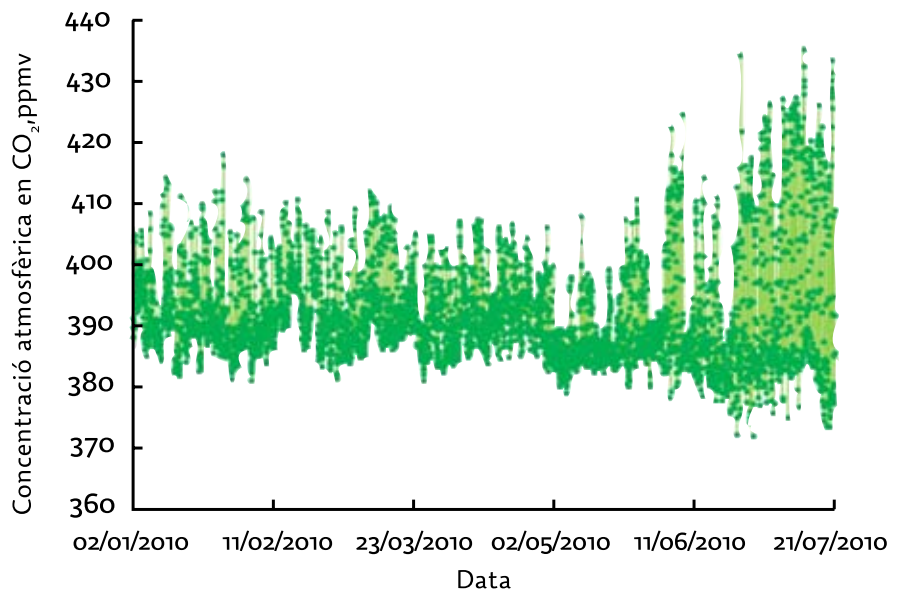
Des del punt de vista ecosistèmic, s'utilitzen estacions micrometeorològiques (foto 1) i hidrològiques o torres altes, equipades amb sensors que mesuren de manera contínua diverses variables meteorològiques i ambientals (pluviometria, velocitat i direcció del vent, temperatura i humitat de l'aire, radiacions, concentracions de gasos, etc.). A més, es fan seguiments a escala local per avaluar les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle (foto 2), la composició de l'aire, el contingut de carboni del sòl, la productivitat i biodiversitat, etc.

Alguns productes obtinguts d'aquestes mesures inclouen el seguiment de l'intercanvi ecosistèmic net de gasos amb efecte d'hivernacle com el CO<sub>2</sub> relacionat amb activitats agrícoles (figura 3) i de l'evolució de la concentració de l'aire en CO<sub>2</sub> (figura 4), l'avaluació de la productivitat primària bruta, l'eficiència de l'ús de l'aigua o de la llum, etc.

Els estudis atmosfèrics completen els estudis ecosistèmics i impliquen



**Figura 3.** Intercanvi ecosistèmic net de CO<sub>2</sub> en què es reflecteix l'absorció i l'emissió de CO<sub>2</sub> en dos camps de conreu a França i la influència de les pràctiques agrícoles (adaptat de Béziat *et al.*, 2009). L'absorció és més intensa a la primavera (fase de creixement de la vegetació) i a la tardor (fase de rebrots); el pas del rascle i la pluja estimulen l'emissió de CO<sub>2</sub>, però, globalment, els camps funcionen com a embornals de carboni.



**Figura 4.** Seguiment continu de la concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub> a l'estació del CRAM (Centre de Recerca d'Alta Muntanya), a prop del túnel de Vielha, amb una resolució d'1 ppmv CO<sub>2</sub> (ppmv = parts per milió per volum) (IC3, 2010). La concentració varia diàriament, per exemple segons l'activitat fotosintètica al voltant de l'estació, el grau de contaminació de l'aire i la direcció dels vents.

la realització de vols equipats per mesurar la concentració de diòxid de carboni al llarg de transectes i perfils a diferents altituds, i estudiar els patrons de transport d'aquest gas a escala regional. A més, les tècniques de teledetecció (imatges satel·litals i aèries) i la modelització permeten caracteritzar i interpretar les dinàmiques

espaciotemporals dels fluxos de carboni, aigua i energia i els canvis en els ecosistemes a diferents escales, des de l'escala local fins a l'escala regional. Ajuden al seguiment de la cobertura vegetal, el contingut d'aigua del sòl (figura 5), la dinàmica de la cobertura de neu i els riscos d'allaus.

## El futur de FLUXPYR

L'estructuració de la xarxa, indispensable per a l'estudi dels canvis climàtics als Pirineus, aporta molts beneficis: facilita l'organització de tallers tècnics i la formació d'experts multidisciplinaris i l'enfortiment d'una recerca multidisciplinària i internacional. A més, permet desenvolupar propostes de recerca conjuntes de més abast, redactar articles científics innovadors, generar dades de qualitat i elaborar models més precisos. Això ajuda a informar de manera eficaç i robusta les polítiques agroambientals i de desenvolupament socioeconòmic, d'adaptació i d'atenuació del canvi global.

FLUXPYR és un projecte a relatiu curt termini, i s'enfronta a diversos reptes. La curta durada no permet obtenir sèries de dades gaire llargues, i fa difícil generar productes definitius. No obstant això, la mo-

delització facilita la integració de les dades i el desenvolupament de productes predictius. Sens dubte, FLUXPYR aconsegueix fomentar una col·laboració activa entre totes les institucions implicades, dur a terme activitats conjuntes i posar en comú dades, més enllà dels interessos corporatius o individuals de cadascun dels socis i les persones involucrades. El seu èxit i la seva continuïtat dependran, d'una banda, de la seva capacitat per generar productes científics d'alta qualitat, i de l'altra, de la seva capacitat per convertir aquests productes en elements útils per a la societat i la gestió del medi ambient,

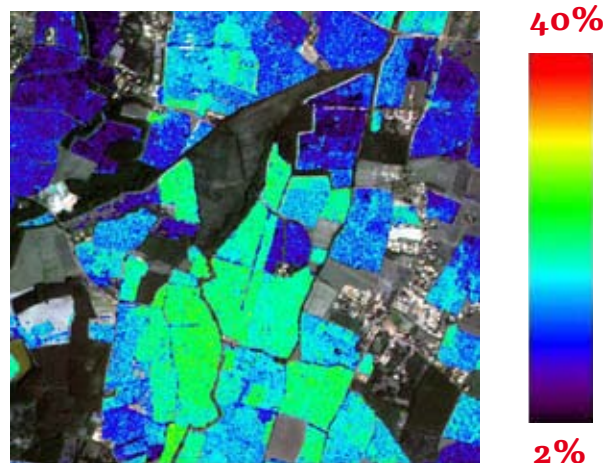


Figura 5. Mapa de la humitat del sòl obtinguda a partir de dades Radar TERRASAR X (F. Baup, CES-BIO). Les zones més seques són les de color blau fosc.

i per connectar-se amb les xarxes i els actors que ja treballen en el tema del canvi climàtic a Europa.

## Agraïments

FLUXPYR és un programa cofinançat per la Unió Europea - FEDER, la Generalitat de Catalunya (Oficina Catalana del Canvi Climàtic del Departament de Medi Ambient i Habitatge, i Departament d'Innovació, Universitats i Empresa) i el Conseil Régional Midi-Pyrénées. FLUXPYR rep suport addicional dels ministeris francesos, CNES, INSU, UPS, UTM, APEM, ETH, ARPE, IPE/CSIC, CEFE, Universitat de Hèlsinki, CTP, OPCC.

### Fabrice Gouriveau

Laboratori d'Ecologia Funcional i Canvi Global (ECOFUN, <http://ecofun.ctfc.cat>), Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC), Solsona, Espanya.  
[fabrice.gouriveau@ctfc.cat](mailto:fabrice.gouriveau@ctfc.cat)

### Maria Teresa Sebastià

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària, Universitat de Lleida, Espanya.

## BIBLIOGRAFIA

- ARPE (AGENCE RÉGIONALE POUR L'ENVIRONNEMENT DE MIDI-PYRÉNÉES) (2009). *L'impact du changement climatique en Midi-Pyrénées. Exemple de la chaîne des Pyrénées*. 78 p. <<http://www.arpe-mip.com/html/1-6165-Le-changement-climatique-en-Midi-Pyrenees.php>> [Consulta: 4 novembre 2010].
- BENISTON, M. (ed.) (1994). *Mountain environments in changing climates*. Londres: Routledge. 461 p.
- BENISTON, M. (2003). «Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts». *Cambio climático*, 59: 5-31.
- BEZIAT, P.; CESCIA, E.; DEDIEU, G. (2009). «Carbon balance of a three-crop succession over two cropland sites in South West France». *Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 1628-1645.
- COX, P.; BETTS, R.; JONES, C.; SPALL, S.; TOTTERDELL, I. (2000). «Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model». *Nature*, 408: 184-187.
- CANADELL, J. G. [et al.] (2007). «Factoring out natural and indirect human effects on terrestrial carbon sources and links». *Environmental Science & Policy*, 10: 370-384.
- GILMANOV, T. G. [et al.] (2007). «Partitioning European grassland net ecosystem

CO<sub>2</sub> exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121: 93-120.

● IC3 (INSTITUT CATALÀ DE CIÈNCIES DEL CLIMA) (2010). *Dades de l'estació del CRAM (Centre de Recerca d'Alta Muntanya)*. [en línia] <<http://www.carboschools.cat/cram/cram-vielha-dades.asp>> [Consulta: novembre 2010]

● IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; Miller, H. L. (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press. 996 p.

● MEA (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT) (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington DC: Island Press.

● SOUSSANA, J. F. [et al.] (2007). «Full accounting of the greenhouse gas (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) budget of nine European grassland sites». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121: 121-134.

● WALKER, B. H., STEFFEN, W. L. (eds.) (1996). *Global Change and Terrestrial Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press.