

Ecogeomorfologia i drons com a eines de gestió dinàmica postincendi. El cas de la comarca del Pariatge, Mallorca

Joan Estrany¹

*Departament de Geografia
Universitat de les Illes Balears
joan.estrany@uib.cat*

Alex Calsamiglia

Departament de Geografia, UIB

Marc Carriquí

Departament de Biologia, UIB

Julián García-Comendador

Departament de Geografia, UIB

Miquel Nadal

Departament de Biologia, UIB

Josep Forteza

Departament de Geografia, UIB

Maurici Ruiz

Servei de SIG i Teledetecció, UIB

Bartomeu Alorda

Departament de Física, UIB

Jorge Gago

Departament de Biologia, UIB

Resum

Els incendis forestals són considerats un dels factors causals més importants en els processos de desertificació. Els territoris insulars com Mallorca són particularment sensibles als impactes antròpics, per la seva major fragilitat socioecològica. L'increment de superfície cremada a Mallorca d'ençà el 2011 esperoneja a vincular gestió forestal i recerca amb interdisciplinarietat i avenços tecnològics. L'ecogeomorfologia permet investigar el paper dels processos geomorfològics en la recuperació de la vegetació. Endemés, la introducció dels vehicles aeris no tripulats com a instruments de teledetecció presenta noves oportunitats en el monitoratge de processos ambientals. Aquest article pretén dilucidar el potencial de l'ecogeomorfologia i els drons per aplicar una gestió post-incendi més efectiva i dinàmica, integrant la capacitat de resiliència dels ecosistemes amb la connectivitat dels sediments per restaurar el paisatge.

Paraules clau: gestió postincendi, connectivitat dels sediments, ecofisiologia vegetal, UAV, ecosistemes mediterranis.

1. Equip de recerca: Mediterranean Ecogeomorphological and Hydrological Connectivity Research Team; <http://medhycon.uib.cat>.

Resumen: *Ecogeomorfología y drones como instrumentos de gestión dinámica post-incendio. El caso de la comarca del Pariatge, Mallorca*

Los incendios forestales son uno de los factores causales más importantes en los procesos de desertificación. Los territorios insulares como Mallorca son particularmente sensibles a los impactos antrópicos, a causa de su mayor fragilidad socioecológica. El incremento de superficie quemada en Mallorca desde el año 2011 incita vincular gestión forestal e investigación a través de interdisciplinariedad y avances tecnológicos. La ecogeomorfología permite investigar el papel de los procesos geomorfológicos en la recuperación de la vegetación. Además, la introducción de vehículos aéreos no tripulados como instrumentos de teledetección presenta nuevas oportunidades en la monitorización de procesos ambientales. Este artículo pretende dilucidar el potencial de la ecogeomorfología y de los drones para aplicar una gestión post-incendio más efectiva y dinámica, integrando la capacidad de resiliencia de los ecosistemas con la conectividad de los sedimentos para restaurar el paisaje.

Palabras clave: gestión post-incendio, conectividad de sedimentos, ecofisiología vegetal, UAVs, ecosistemas mediterráneos.

Abstract: *Ecogeomorphology and drones as dynamic tools for post-fire management. The experience in the Pariatge County, Mallorca*

Wildfires are one of the most significant driving factors in desertification processes. Furthermore, insular territories such Mallorca are more affected by human impacts due to their intrinsic socioecological fragility. The increase of burned surface area since 2011 in Balearic Islands involves a challenge in which forest management and research through interdisciplinary and technological advances should be joined. Ecogeomorphology is an emergent discipline which allows investigating the role of geomorphic processes in the vegetation recovery. Additionally, the introduction of unmanned aerial vehicles as remote-sensing tools offers new and exciting opportunities for monitoring environmental processes. This paper pretends to elucidate the potential of ecogeomorphology and drones to implement more effective and dynamic post-fire management integrating both the resilience capacity of ecosystems with sediment connectivity for landscape restoration.

Keywords: post-fire management, sediment connectivity, vegetal ecophysiology, UAVs, Mediterranean ecosystems.

* * *

1. Introducció

Els incendis forestals són considerats un dels factors causals més importants de l'erosió i la degradació del sòl (Úbeda i Mataix-Solera, 2008). Aquesta degradació acaba, alhora, contribuint a la desertificació, amb un impacte significatiu en les poblacions humanes a més de repercussions derivades en el canvi global. Dins els ecosistemes mediterranis, les illes Balears esdevenen un territori amb unes característiques específiques condicionades per la insularitat

i una fisiografia que impliquen una gestió particular dels efectes causats pels incendis forestals. Les estadístiques indiquen que en els darrers 30 anys 18.375 ha han estat arrasades pel foc. Tot i així, la implementació del Pla de Defensa contra Incendis Forestals durant la primera dècada del segle XXI propicià un important descens de la superfície cremada, sense que cap any se superessin les 500 ha afectades (Domènech, 2015). Malauradament, a partir de l'any 2011 –en el qual es produeix el primer gran incendi (i. e. >500 ha) d'ençà el 1999– la tendència s'ha invertit per mor d'un increment de biomassa causat per la consolidació de la transició forestal i un règim de precipitacions superior a la mitjana durant el període 2007-2011. Igualment, la gestió forestal –basada en dinàmiques de creixement natural i en una intervenció ràpida dels conats d'incendi– ha provocat paradoxalment que una dècada eficaç en la lluita contra incendis hagi derivat en conseqüències devastadores quan un incendi amb condicions meteorològiques adverses 30-30-30² no és controlat ràpidament. En aquest context, el major incendi forestal ocorregut des que es tenen registres oficials –s'iniciaren al 1972– afectà el juliol de 2013 un total de 2.407 ha a la comarca del Pariatge, a l'estrep sud-occidental de la serra de Tramuntana de Mallorca, i generà una important alarma social.

Després de l'abast territorial i socioambiental dels incendis forestals ocorreguts durant l'estiu de 2013, sorgeix més que mai la necessitat imperiosa de vincular gestió forestal i recerca amb avenços tecnològics i interdisciplinarietat com a nexes d'unió. És just aquí on l'ecogeomorfologia pot millorar els processos de restauració postincendi en un escenari de canvi global on el risc de desertificació s'accelera. Es tracta d'una subdisciplina científica que investiga a la interfase que es genera de la combinació d'hidrologia, geomorfologia i ecologia/biologia (p. e. Saco i Moreno-de las Heras, 2013).

En l'anàlisi sobre les relacions espacials i la dinàmica dels fluxos biofísics en el paisatge, l'ecogeomorfologia compta amb una potent eina: la connectivitat, definida com la transferència de matèria entre dos compartiments diferents del paisatge (Jain i Tandon, 2010; Wainwright *et al.*, 2011). L'objectiu no ha de ser d'altre que avaluar la sensibilitat de les diferents parts del paisatge als processos de canvi, als factors limitadors o les pressions que es produeixin (Brierley *et al.*, 2006). Per tant, els coneixements específics són necessaris per predir escenaris futurs del paisatge, reconeixent diferents formes i escales de (des-)connexió. L'anàlisi del caràcter i el comportament dels compartiments del paisatge, la manera com encaixen entre si (el seu conjunt i el patró) i la connectivitat entre ells, proporciona una plataforma per interpretar el funcionament dels processos ecogeomorfològics (i. e., Lane i Richards, 1997; Michaelides i Wainwright, 2002).

La marcada alteració de la distribució espacial de la vegetació causada pels incendis forestals ve acompanyada per un notable increment de la connectivitat

2. Més de 30°C de temperatura, menys del 30% d'humitat relativa i vents de més de 30 km h⁻¹.

hidrològica del paisatge. Aquest fet provoca la pèrdua dels recursos hídrics dels ecosistemes i, en conseqüència, afecta el rendiment i el creixement de les plantes (Wilcox *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2000). Per tant, els canvis catastròfics –en la seva majoria irreversibles– tendeixen a la desertificació del paisatge (May, 1977; Scheffer *et al.*, 2001). A més a més, Davenport *et al.* (1998) demostraren que petites alteracions per davall dels llindars crítics en la distribució espacial de la vegetació podrien donar lloc a grans canvis en la connectivitat hidrològica del paisatge. En sobrepassar aquests llindars de degradació, els ecosistemes pateixen “fugues”, el que significa que la vegetació que queda perd, en gran mesura, la capacitat d’obstruir i capturar el flux superficial d’aigua i sediments (Ludwig *et al.*, 2007).

Des d’una perspectiva de gestió, la comprensió del grau de connectivitat en un paisatge pot ajudar en la mitigació d’impactes. Aquelles àrees dominades per una elevada connectivitat no responen a manipulacions a petita escala en presentar una inèrcia que aquesta manipulació no pot superar. Com a conseqüència, els protocols d’avaluació i seguiment han de ser sensibles als canvis en la connectivitat a l’escala de maneig apropiada i així proporcionar la informació necessària per aplicar la gestió òptimament (Okin *et al.*, 2009). Per la seva banda, entendre els patrons que regulen l’erosió del sòl, la distribució de les partícules i la producció de sediment són factors clau per controlar i avaluar la qualitat del sòl, de l’aigua i de la vegetació. Mantenir i/o millorar la qualitat del sòl requereix gestionar en el camp i a escala de conca de drenatge: l’erosió, la pèrdua i moviment del carboni orgànic del sòl i la vegetació. Treballant a aquesta escala, es pot conèixer el patró de redistribució del sòl, cartografiar amb detall els components de la superfície del sòl que afecten els processos erosius (vegetació, pedregositat, crostes biològiques, entre d’altres) i la continuïtat i connectivitat hidrològica (Arnau-Rosalén *et al.*, 2008), relacionar-lo amb el transport de sediment fi (Quiñonero *et al.*, 2013) i amb l’àrea font d’on prové, per finalment determinar l’efectivitat de les pràctiques de gestió de l’escorrentia i l’erosió (Estrany *et al.*, 2015).

Històricament, els vehicles aeris no tripulats (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*) han estat utilitzats inicialment per a aplicacions militars. Més recentment, l’ús de vehicles aeris no tripulats en l’àmbit civil com a instruments de teledetecció presenta noves i interessants oportunitats. Les millores en la disponibilitat d’elevada precisió en sistemes GPS, juntament amb la disponibilitat de càmeres digitals de qualitat i altres sensors en miniatura s’han traduït en un augment de l’ús civil de vehicles aeris no tripulats (Nebiker *et al.*, 2010). La major resolució espacial disponible des de plataformes convencionals, com ara satèl·lits i avions tripulats, es mou en un rang de 20 a 50 cm/píxel. En canvi, els vehicles aeris no tripulats són capaços de volar molt més baix i per tant adquirir imatges amb una resolució molt més gran (Hunt *et al.*, 2010), sovint amb una resolució subdecimètrica, fins i tot assolint 1 cm/píxel. A més a més, la resolució temporal dels sistemes convencionals està limitada per la

disponibilitat de plataformes en avions i/o per les característiques orbitals dels satèl·lits. Així, per a la vigilància de vegetació altament dinàmica, els sensors de satèl·lit estan tot sovint limitats per mor de la baixa freqüència de pas per l'àrea d'estudi (Gago *et al.*, 2015).

Pel que fa a la vegetació, molts estudis han utilitzat amb èxit els vehicles aeris no tripulats per cartografiar i monitorar àrees de vegetació d'interès agrícola i/o mediambiental (Dunford *et al.*, 2009). Johnson *et al.* (2003) utilitzaren un petit vehicle aeri no tripulat d'ala fixa per recollir imatges sobre una vinya comercial a Califòrnia. La imatge tenia una resolució espacial de 20 cm/píxel i es processaren les escenes de zones de vegetació i sòl per calcular posteriorment el percentatge de coberta vegetal. El monitoratge de petites parcel·les dins conreus de blat al sud-oest de França (Lelong *et al.*, 2008) és un altre exemple de vehicles aeris no tripulats que ajuden en els processos agrícoles. Així, s'utilitzà una càmera digital modificada per recollir imatges en quatre bandes (vermell, verd, blau i infraroig proper) per permetre el càlcul dels índexs de vegetació, tals com l'Índex de Vegetació Blau de Diferència Normalitzada (BNDVI, *Blue Normalized Difference Vegetation Index*).

Pel que fa a la geomorfologia, fins fa ben poc la informació referent a la superfície terrestre –ja fos de relleu, coberta vegetal, temperatura, etc.– depenia fonamentalment de les imatges de satèl·lit, amb un cost molt elevat i amb resolucions insuficients per a l'estudi de fenòmens locals. L'aparició dels UAV permet, doncs, obtenir dades d'alta resolució (i .e., 1 cm² de píxel) amb total autonomia, sense dependre de recursos aliens als grups d'investigació i amb costos –tan econòmics com temporals– més reduïts i per tant assequibles (Vericat *et al.*, 2009; Fonstad *et al.*, 2013). Per altra banda, un dels avantatges més importants dels UAV és la possibilitat que ofereixen d'obtenir dades a l'escala temporal adequada, podent realitzar vols en l'interval de temps necessari pel seguiment de fenòmens dinàmics com són l'evolució dels patrons espacials de connectivitat i de BNDVI.

Aquest article pretén demostrar de forma explícita el paper dels processos geomorfològics en la regeneració de la vegetació a partir de l'afecció d'un incendi forestal i les tasques posteriors de recuperació realitzades. Per això es combinen tècniques geomorfològiques amb d'altres de seguiment del creixement de la vegetació. Aquesta combinació es realitza mitjançant l'ús d'UAV que permeten construir models digitals del terreny (MDT) d'alta resolució i obtenir l'índex de connectivitat dels sediments (Cavalli *et al.*, 2013). Es tracta d'una anàlisi dinàmica de l'evolució del paisatge combinant la connectivitat dels sediments –com a indicador del potencial de l'erosió del sòl– i del creixement de la vegetació a través del BNDVI. L'objectiu final és identificar aquelles zones amb major potencial de degradació i així definir amb precisió estratègies de gestió post-incendi més efectives.

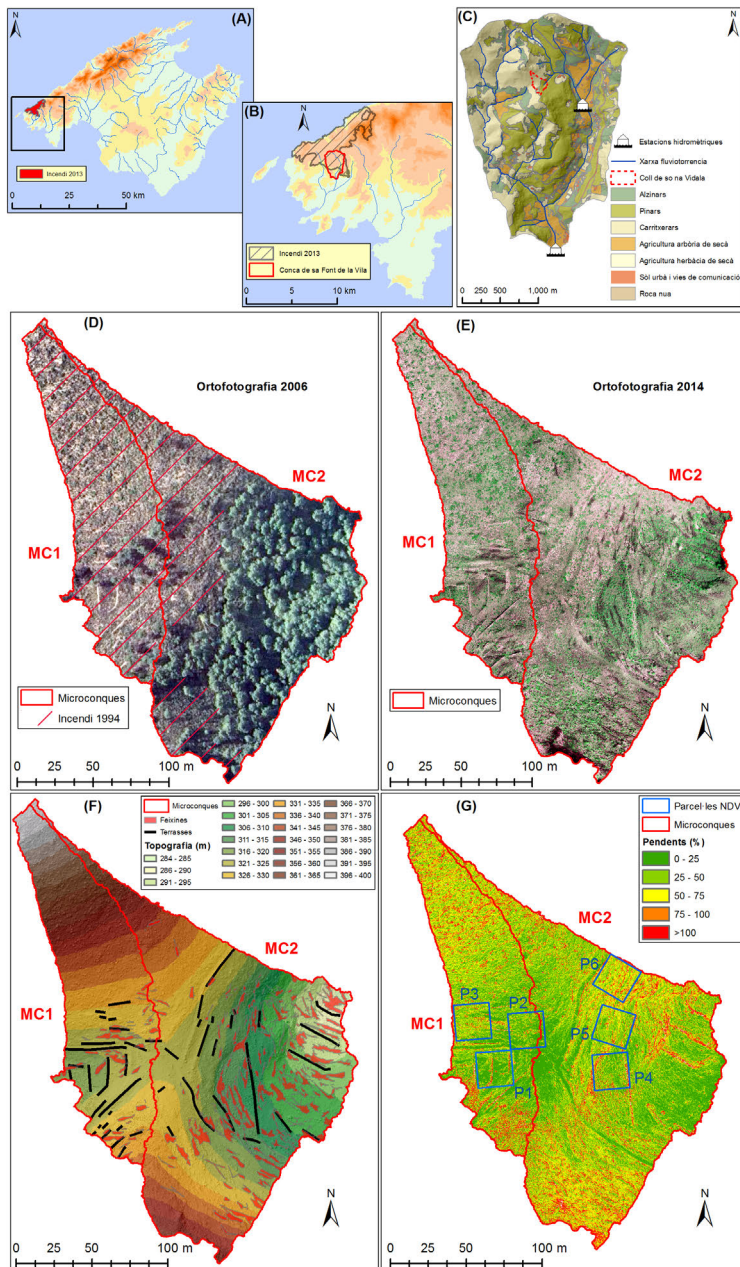
2. Material i mètodes

2.1. Àrea d'estudi

Fou seleccionada la conca de sa Font de la Vila (4,8 km²), representativa del Pariatge, comarca caracteritzada pels processos d'aforestació de terres de conreu marginals i per la severa afecció d'incendis forestals en els darrers 20 anys. La litologia es compon principalment d'argiles i margues del Keuper a les valls inferiors amb suaus vessants de pendents <10%, el que –juntament amb l'elevada capacitat de camp dels sòls– facilita el desenvolupament agrícola. A les parts altes de la conca predominen dolomies del Retià i calcàries del Lias. Els usos del sòl es caracteritzen per la presència massiva d'estructures tradicionals de conservació del sòl (37% de la conca), la qual cosa denota un intens ús agrícola, encara que pretèrit, perquè actualment el 71% de la conca està coberta per vegetació natural. En els últims 20 anys la conca s'ha vist afectada per dos grans incendis forestals. El 1994, amb un afectació del 45% de la superfície; mentre que el 2013 va arribar al 77% d'afectació, més de la meitat del qual ja s'havia cremat el 1994. Immediatament després de l'incendi forestal del 2013, la conca va ser equipada amb dues estacions d'aforament en conques integrades per realitzar un monitoratge continu de l'exportació d'aigua i sediments.

A la capçalera de sa Font de la Vila, foren seleccionades dues microconques de drenatge (i. e. <3 ha), al coll de So na Vidala. La microconca 1 (en endavant, MC1) té una superfície d'1,1 ha i les seves altituds oscil·len entre els 398 m a la seva part més alta i els 315 a la part baixa, amb un pendent mitjà del 47%. La microconca 2 (en endavant, MC2) té 2,2 ha, amb unes altituds entre 283 i 400 m i un pendent mitjà del 44%. Els sòls es desenvolupen sobre la base d'aquests materials parentals, així que sobre les calcàries es desenvolupa roca nua o entisòls, mentre que en els materials margosos es desenvolupen alfisòls, considerant també la presència de marjades. Les microconques són representatives dels usos del sòl amb una massiva presència de marjades i parats (fig. 1f) que cobreixen una longitud de 720 m (56% dins de MC2). Ambdues microconques varen ser completament i severament arrasades per l'incendi de 2013, mentre que el foc de 1994 només va afectar un 40% de MC2 i completament MC1. Amb tot, la dinàmica de la coberta vegetal va ser diferent entre les dues microconques fins a l'incendi de 2013. D'una banda, MC2 va ser completament coberta per la vegetació natural típica de camps abandonats, amb espècies com el pi (*Pinus halepensis*), l'alzina (*Quercus ilex*), la mata (*Pistacea lentiscus*), el càrritx (*Ampelodesmos mauritanica*) i el garballó (*Chamaerops humilis*). D'altra banda, la coberta vegetal a MC1 va ser menor a causa que la recuperació postincendi 1994 no es va completar. Al coll de So na Vidala es va implementar una restauració postincendi intensa amb la construcció de feixines (fig. 1f). Aquesta acció de protecció del sòl –que cobreix 737 m² a l'àrea d'estudi– augmenta la infiltració, afegeix rugositat, redueix

Figura 1. Area d'estudi



(A): Localització de l'incendi 2013 a l'illa de Mallorca.

(B): Localització de l'incendi 2013 i de la conca de sa Font de la Vila a la comarca del Pariaatge.

(C): Usos del sòl, localització de les estacions hidromètriques i del coll de So na Vidala a la conca de sa Font de la Vila.

(D): Ortofotografia de l'any 2006 del coll de So na Vidala amb l'afecció de l'incendi 1994.

(E): Ortofotografia de l'any 2014 del coll de So na Vidala arrasades per l'incendi 2013.

(F): Topografia i presència de feixines i marjades al coll de So na Vidala.

(G): Pendents i localització de les parcel·les per estimació de la coberta vegetal al coll de So na Vidala.

l'erosió i ajuda a retenir petites quantitats de sòl erosionat. Té una efectivitat aproximada per a un període d'un a dos anys, proporcionant protecció a curt termini en els vessants on la vegetació permanent mentrestant es restableix i proporciona control de l'erosió a llarg termini. Cal assenyalar que el 80% d'aquesta acció de restauració es va dur a terme a MC2 –a zones amb un pendent mitjà del 48% (fig. 1g)– en contenir suficients arbres de mida adequada. Mentrestant, a MC1 –amb un pendent mitjà del 47% (fig. 1g)– la vegetació no s'havia recuperat des de l'incendi de 1994.

El clima del coll de So na Vidala es classifica com a mediterrani temperat subhúmit segons la classificació climàtica d'Emberger (Guijarro, 1986). La precipitació mitjana anual és de 518 mm (1974-2010, dades proporcionades per AEMET), amb un coeficient de variació interanual del 29%. La tardor és l'estació més plujosa, seguida d'hivern, primavera i estiu. Tempestes intenses, amb un període de retorn de 10 anys, poden produir 85 mm en 24 hores. La temperatura mitjana anual d'Andratx (83 m) és de 18°C (1974-2010, AEMET). Les condicions hidrometeorològiques l'any posterior a l'incendi (agost 2013 i octubre 2014) varen determinar la recuperació de la vegetació en relació als processos hidrològics i d'erosió del sòl. Pel que fa a les precipitacions, es va registrar una quantitat anual de 517 mm. La mitjana de les intensitats de precipitació trentaminutals màximes durant el període d'estudi varen ser de 19 mm h⁻¹, amb un pic de 55 mm h⁻¹, enregistrat el 29 d'octubre de 2013. Quant a la temperatura, la mitjana anual va ser de 18°C, generant un potencial d'evapotranspiració de 952 mm amb només 7 mm d'escorrentia. Els mesos més plujosos foren novembre i desembre de 2013, amb 172 i 123 mm de pluja, respectivament; mentre que entre juliol i setembre de 2014 (ambdós inclosos) no s'enregistraren precipitacions.

2.2. Campanyes de vol i aixecament topogràfic

Durant el 2014 es realitzaren 4 campanyes de camp al coll de So na Vidala amb freqüència estacional (gener, abril, juliol i octubre) per tal d'avaluar els canvis que es produïren al relleu i a la vegetació. A cada campanya es prengueren una mitjana de 600 fotografies aèries utilitzant un hexacòpter lleuger (<5 kg; fig. 2), al cardan del qual s'hi fixà una càmera digital.

L'adquisició de fotografia aèria mitjançant els UAV permet la realització d'aixecaments topogràfics a través de la tècnica anomenada *Structure from Motion* (SfM). Tot i que aquest conjunt d'algoritmes ja van ser desenvolupats per Ullman *et al.* (1979), no ha estat fins aquests darrers anys que han acabat donant forma a nous programaris de reconstrucció tridimensional. El present estudi s'ha realitzat amb *Photoscan*, un programari desenvolupat per la companyia russa *Agisoft LLC*. La reconstrucció tridimensional consta, doncs, de tres processos fonamentals: alineació de fotografies, reconstrucció geomètrica i reconstrucció de la textura. El primer procés permet identificar, a partir de

Figura 2. Detall del vehicle aeri no tripulat (UAV; *Unmanned Aerial Vehicle*) al coll de So na Vidala (Andratx, serra de Tramuntana, Mallorca)



la longitud focal de l'objectiu, la posició en l'espai de la càmera i l'angle en què es prengué cadascuna de les imatges utilitzades en la modelització. La reconstrucció geomètrica de la superfície es realitzà en base a la posició relativa entre punts coincidents (i. e. valors d'RGB) en diferents imatges i, per tant, cal comptar amb un solapament significatiu entre elles. Dins d'aquest segon procés, cal destacar la dotació de referència espacial a l'inicial model adimensional. Per a la seva georeferenciació, s'utilitzaren 57 punts de control distribuïts de forma aleatòria cobrint representativament el conjunt de l'àrea d'estudi. Les coordenades d'aquests punts de control s'enregistraren amb un GPS diferencial *Leica 1200* (RSME < 0,06 m) i van ser introduïdes al model per a la seva transformació, translació i escalat. El darrer procés, de reconstrucció de la textura, es dugué a terme amb la projecció del mosaic d'imatges aèries sobre la superfície transformada. Un cop generat el model tridimensional, Photoscan permet l'exportació de les dades topogràfiques a diferents formats i del mosaic de fotografies aèries, així com una anàlisi posterior de les característiques físiques del terreny; i. e. àrees, pendents, rugositat i, finalment, la connectivitat. En el present estudi s'ha treballat amb el programari d'*ESRI ArcGIS 10.2.1* amb una resolució de 5 cm² de píxel.

2.3. Modelització de la connectivitat hidrològica i dels sediments

A partir del MDT generat amb Photoscan es modelitzà la connectivitat dels sediments a partir de l'Índex de Connectivitat (IC), el qual permet quantificar el potencial d'erosió-deposició de sediments com a indicador de connectivitat

hidrològica. A partir d'eines d'anàlisi espacial disponibles en els sistemes d'informació geogràfica (SIG), el valor de connectivitat pot ser calculat per a cada tessella (píxel) d'una cartografia ràster al nivell de detall que es consideri adient. Borselli *et al.* (2008) varen definir aquest índex a partir de la següent expressió:

$$IC = \log_{10} \frac{D_{up}}{D_{dn}} \quad (1)$$

on IC és l'índex de connectivitat, D_{up} és la component aigües amunt i D_{dn} és la component aigües avall. D_{up} defineix les característiques de l'àrea que drena en un punt determinat i es defineix a partir de l'expressió:

$$D_{up} = \bar{W} \bar{S} \sqrt{A} \quad (2)$$

on W és la Impedància mitjana de l'àrea que drena en cada píxel, S és el pendent mitjà i A és l'àrea.

D_{dn} defineix les característiques del trajecte que ha de recórrer una partícula fins al canal o el punt de desguàs de la conca i ve definit per la següent equació:

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{W_i S_i} \quad (3)$$

on W és la impedància corresponent a cada píxel, S n'és el pendent i d és la distància a recórrer.

L'IC resultant d'aquests càlculs varia en un rang de $[-\infty, +\infty]$, sent major la connectivitat com major és el valor d'IC. La seva magnitud depèn del pendent (S), de l'àrea de drenatge (A), la distància a recórrer (d) i la impedància del terreny (W). Aquest darrer factor W , que representa la resistència d'una superfície al pas de l'aigua, està íntimament relacionat amb la presència o absència de vegetació. En una àrea severament cremada, aquesta impedància es calcula a partir de l'índex de rugositat (IR) proposat per Cavalli *et al.* (2013), el qual s'ha estimat tenint en compte la vegetació.

2.4. Seguiment de la vegetació

S'escolliren 6 parcel·les de 25 x 25 m, representatives de les dues microconques i, al mateix temps, d'àrees amb diferents elements de retenció de l'erosió: marjades, feixines i vessants sense protecció (fig. 1g). Les imatges captades per l'UAV foren processades amb el programari informàtic *Matlab*[®] per tal d'obtenir l'índex de vegetació de diferència normalitzada per a cada píxel de la composició d'imatges, conegut com a $BNDVI$:

$$BNDVI = \frac{IR-B}{IR+B} \quad (4)$$

on IR és la reflectància a la banda infraroja (ca. 800 μm) i B correspon a la banda blava (ca. 465 μm). A continuació, es determinà el valor de recobriment per a cada microconca com el percentatge de píxels amb un valor de $BNDVI$ per sobre del llindar de 0,1 sobre el total per a cada composició fotogràfica.

A més, es realitzaren mostrejos en quadrícules de 1 x 1 m d'espècies herbàcies i plàntules a cadascuna de les parcel·les de les dues microconques. A cada quadrícula es realitzà un recompte del nombre d'individus per tal d'obtenir la densitat.

Finalment, s'avaluà el contingut hídric relatiu de les principals espècies rebrotadores de la zona –*Pistacia lentiscus*, *Quercus ilex*, *Chamaerops humilis* i *Ampelodesmos mauritanica*– seguint la següent fórmula:

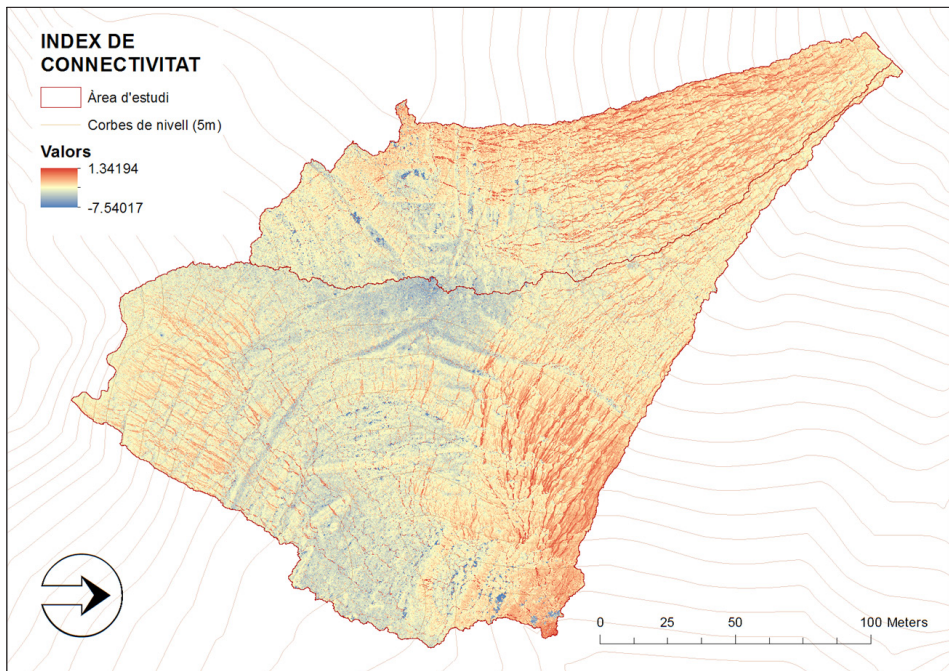
$$CHR(\%) = \frac{\text{Pes fresc} - \text{Pes sec}}{\text{Pes turgent} - \text{Pes sec}} \quad (5)$$

3. Resultats

3.1. Connectivitat hidrològica i dels sediments

El mapa d'IC (fig. 3) indica valors que varien entre -7,54 i 1,34. Com es pot observar a la taula 1, es tracta d'un rang de valors molt pròxim als estudis realitzats per altres autors dels quals cal destacar Cavalli *et al.* (2013) i Messenzehl *et al.* (2014). Ambdós estudis foren realitzats a zones alpines caracteritzades per forts pendents i per una escassa vegetació. Això explica una major connectivitat respecte a l'observada al coll de So na Vidala, tot considerant que on es fa realment palesa aquesta diferència és en els valors mitjans.

Figura 3. Índex de connectivitat corresponent a la campanya de l'octubre de 2014



Mentre que en els dos estudis presentats comparativament, la mitjana a l'IC és de -3,29 i -2,35 respectivament, al coll de So na Vidala el valor mitjà és de -4,96. Per altra banda, la desviació estàndard és de 0,58 i 0,69 respectivament,

mentre que a la present àrea d'estudi és de 0,55. La variació de les dades, doncs, es pot considerar similar. Per contra, la mitjana a l'IC indica que els valors obtinguts per al coll de So na Vidala són inferiors als esmentats estudis realitzats als Alps italians i suïssos, en conques on el pendent mitjà és pròxim al 80%.

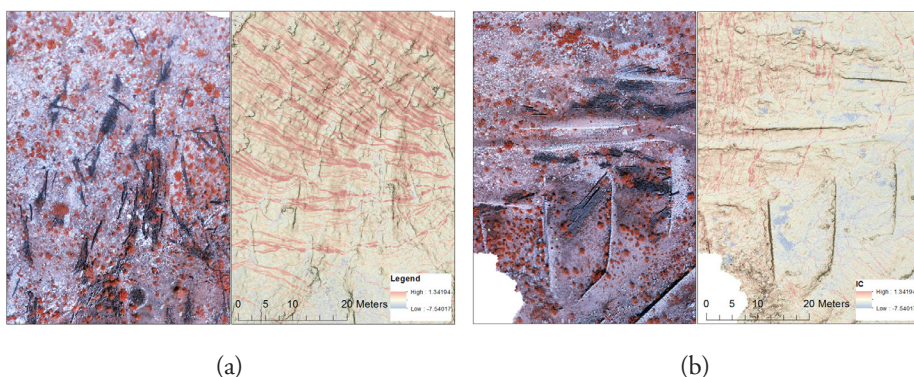
Tot i que aquests valors mostren una connectivitat inferior a la dels estudis de Cavalli *et al.* (2013) i Messenzehl *et al.* (2014), el fet de ser comparables ja indica la forta magnitud de l'erosió potencial al coll de So na Vidala.

Taula 1. Estadístiques bàsiques de l'índex de connectivitat en estudis disponibles

Estudis IC	Àrea d'estudi	Mínim	Màxim	Mitjana	Desv. Estàndard
	Coll de So na Vidala	-7,54	1,34	-4,96	0,55
Cavalli <i>et al.</i> (2013)	Gandria (Itàlia)	-6,07	2,69	-3,29	0,58
Messenzehl <i>et al.</i> (2014)	Val Müschauns (Suïssa)	-6,34	2,62	-2,35	0,58

L'anàlisi del mapa permet observar el paper determinant del pendent a la connectivitat del coll de So na Vidala. D'aquesta manera, els tons vermells dominen en els vessants de fort pendent i els tons blaus ho fan a les zones planes del coll, així com a les marjades i camins. L'efecte d'aquestes estructures tradicionals de conservació del sòl redueix sensiblement la connectivitat. Les feixines, encara que en menor mesura, també generen una disminució de l'IC (fig. 4).

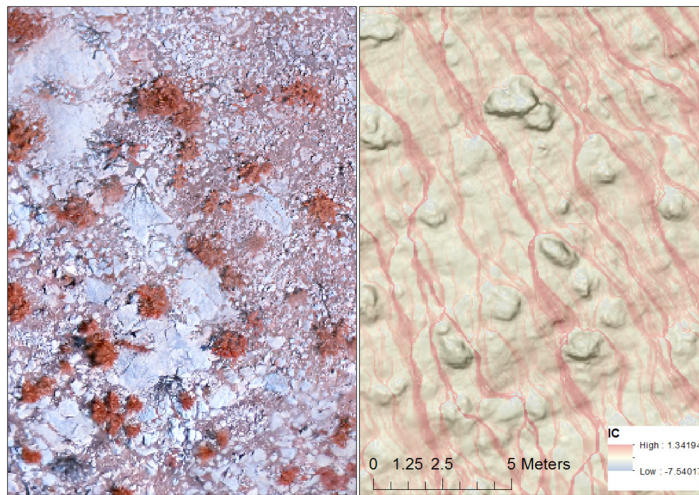
Figura 4. Efectes de (a) feixines i (b) parats i marjades sobre l'índex de connectivitat



Els efectes de la vegetació són força apreciables (fig. 5). La seva progressiva recuperació no només suposa una disminució de l'IC degut a una major impedància sinó que també ho fa forçant l'augment de la distància que recorre cada partícula fins a la seva deposició. Durant el període d'estudi, la baixa intensitat de les precipitacions caigudes ha donat lloc a una dinàmica positiva

afavorida per la implementació de les mesures adequades de restauració; en aquest cas, feixines. Tot i això, altres actuacions de restauració solen anar dirigides a la recuperació de la vegetació com a element de desconexió del flux superficial amb l'objectiu d'evitar l'erosió i afavorir la consolidació dels sòls. La presa de decisions per a les mesures post-incendi pot estar condicionada per diversos factors dels quals destaca l'abast i severitat de l'incendi, la disponibilitat de recursos econòmics, l'accessibilitat de la zona o les seves característiques físiques (i. e. pendent).

Figura 5. Efectes de la vegetació sobre l'índex de connectivitat



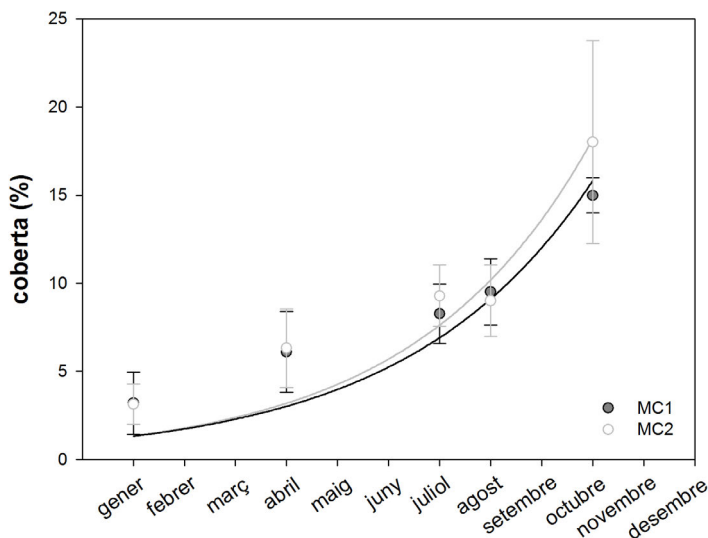
3.2. Evolució de la coberta vegetal

A partir dels ortomosaics obtinguts gràcies a les imatges del dron i el càlcul del *BNDVI* s'ha estimat el recobriment vegetal de cada parcel·la per a les diferents campanyes (taula 2). S'observa com la vegetació segueix una tendència exponencial d'increment en recobriment a ambdues microconques (fig. 6), amb l'excepció del període de canícula estival on el creixement de la vegetació s'estanca (taula 2). Aquesta deturada en l'augment de coberta vegetal es correlaciona amb l'augment de l'estrès tèrmic i hídric, així com amb la disminució en la densitat específica d'herbàcies i plàntules (fig. 7). Tot i així, la coberta durant el període estival no minva gràcies a la capacitat de resistir front a la baixa disponibilitat hídrica de les espècies rebrotadores dominants: *Pistacia lentiscus*, *Quercus ilex*, *Chamaerops humilis* i *Ampelodesmos mauritanica*. Aquesta capacitat de resistència es constata en no observar diferències significatives en el contingut hídric relatiu d'aquestes espècies respecte a la resta de l'any (dades no mostrades).

Taula 2. Evolució de la coberta vegetal (%) al llarg de les campanyes de vol estacionals desenvolupades l'any 2014 segons la presència d'estructures de conservació del sòl

Campanyes	Microconca 1			Microconca 2		
	Parcel·la 1	Parcel·la 2	Parcel·la 3	Parcel·la 4	Parcel·la 5	Parcel·la 6
	Marjades	Feixines	Vessants	Marjades	Feixines	Vessants
Gener 2014	0,74	2,22	6,62	4,07	0,86	4,47
Abril 2014	2,66	5,19	10,45	9,94	2,27	6,76
Juliol 2014	5,40	8,17	11,23	12,12	6,12	9,61
Agost 2014	6,23	9,56	12,73	12,75	5,79	8,46
Octubre 2014	13,32	14,87	16,75	29,51	12,23	12,27

Figura 6. Variació de la coberta vegetal al llarg del període d'estudi

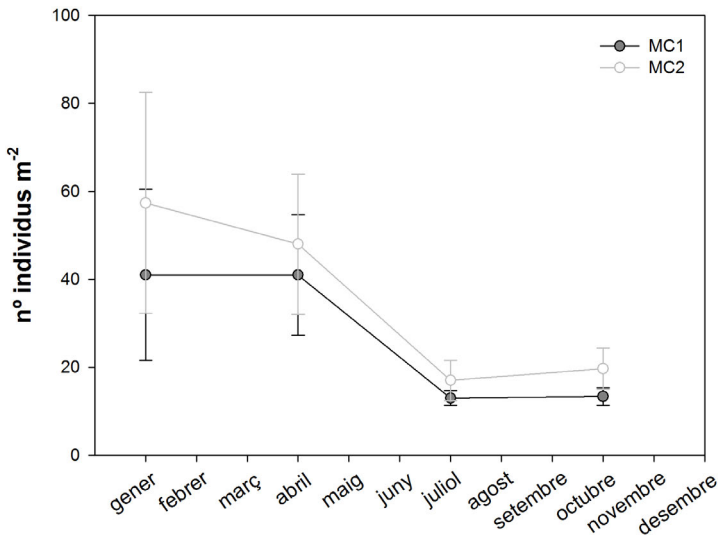


Les mesures es realitzaren els mesos de gener, abril, juliol, agost i octubre de 2014. Els punts corresponen a les mitjanes de les tres parcel·les (25x25 m) de cada microconca, i les barres a l'error estàndard. Ambdues regressions s'han ajustat a un model exponencial ($y=e^{ax}$). Els valors de R^2 per a MC1 i MC2 són 0,80 i 0,86, respectivament.

Es corrobora que la disponibilitat d'aigua en ecosistemes mediterranis és un factor determinant de l'augment del recobriment post-incendi ja que, com s'ha observat en estudis anteriors (López-Soria i Castell, 1992; Riba, 1997), aquesta s'arriba a ajustar als ritmes de precipitacions. Així, el major augment s'observa en el període comprès entre agost i octubre del 2014, coincidint amb unes

condicions de disponibilitat d'aigua més favorables i amb l'inici de la reparació de les herbàcies. Tot i la variació estacional que s'observa en el creixement de la vegetació, aquesta ha aconseguit, en poc més d'un any a partir de l'incendi, passar del 0% de coberta –el mes d'octubre del 2013– a valors d'entre un 12 i un 30% de recobriment a ambdues microconques.

Figura 7. Densitat específica d'herbàcies



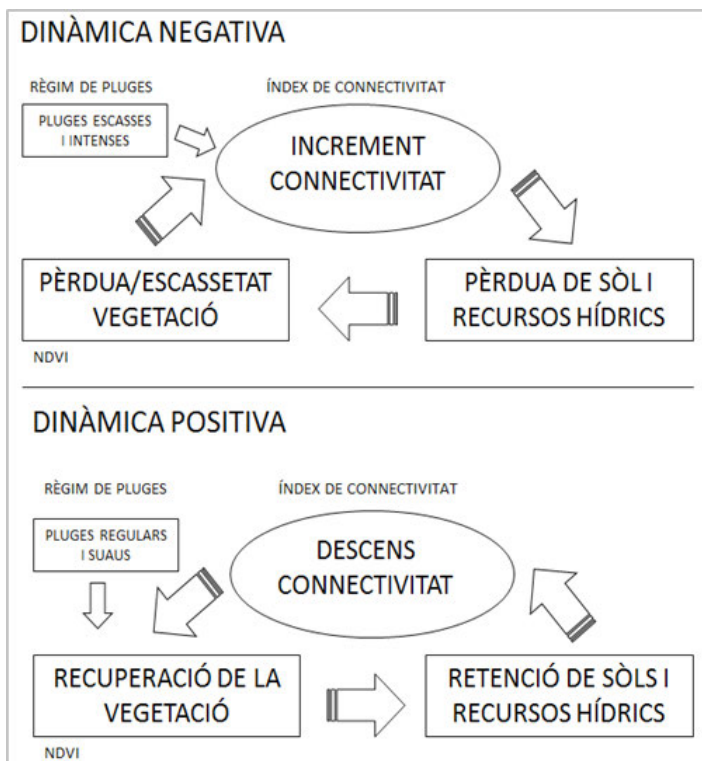
Els diferents colors corresponen als tractaments: incendis 1994/2013 negre (MC1), incendi 2013 gris (MC2). Les diferents lletres indiquen diferències estadístiques significatives (Tukey, $p < 0,10$). Els valors són mitjanes i les barres corresponen a l'error estàndard de 3 rèpliques per microconca.

4. Conclusions

Conèixer bé els patrons de distribució i les relacions entre connectivitat dels sediments i vegetació pot ser de gran ajut per a la presa de decisions o per prioritzar actuacions en cada cas concret. El seguiment en successives campanyes pot permetre una avaluació en funció de com evolucionin els indicadors i donar compte dels resultats d'apostar per una actuació centrada en la restauració de la vegetació o bé en la regeneració a través de la retenció d'aigua i sediments. Més enllà del tipus d'actuació, l'IC resulta molt eficaç a l'hora d'identificar àrees de major potencial erosiu establiment, per tant, prioritats zonals. En aquest sentit, l'indicador mostra una bona correspondència amb les observacions de camp ja que les àrees amb majors valors d'IC, posteriorment als successius episodis de precipitació, presenten evidències d'escolament superficial amb capacitat erosiva. No obstant això, els estudis que recentment han utilitzat

aquest indicador per a l'anàlisi de connectivitat coincideixen en assenyalar que encara hi ha un llarg camí per recórrer en la millora del seu càlcul. Els reptes que es plantegen en relació a l'IC passen necessàriament per la incorporació de factors com la magnitud de les forces que actuen sobre el paisatge o el tipus de processos implicats en la seva transformació.

Figura 8. Diagrama de relacions entre connectivitat dels sediments i vegetació



Una anàlisi dinàmica de la connectivitat dels sediments i la vegetació permet, per tant, observar els canvis i l'evolució de la seva distribució espacial. Aquests canvis vindran determinats principalment per la meteorologia i pel ritme de regeneració de la vegetació. Aquest darrer factor pot presentar patrons de distribució relacionats amb la connectivitat. Així, la interrelació entre aquests dos indicadors pot ser de gran interès científic per tal de valorar les possibles actuacions de restauració postincendi. A priori, la manca de vegetació a causa dels efectes d'un incendi contribueix a una gran exposició de la superfície a l'erosió i, per tant, a un fort increment de la connectivitat. En aquest escenari, una pluja de gran intensitat pot suposar una important pèrdua de sòl i de recursos hídrics. L'escassetat de sòl i d'humitat dificulta encara més la

recuperació de la vegetació, acabant de tancar un cicle de dinàmica negativa (fig. 8). Per altra banda, un règim de pluges més regular i de baixa intensitat pot contribuir a una progressiva recuperació de la vegetació, permetent una major retenció dels sòls i de la humitat, impedit alhora l'escolament superficial per mitjà d'un increment en la impedància del terreny (W) i, consegüentment, fent disminuir l'índex de connectivitat.

El present estudi forma part d'un programa d'investigació d'incendis forestals a Mallorca, que té com a objectiu avaluar els efectes del foc en els processos ecogeomorfològics en conques de drenatge. S'està utilitzant informació d'alta resolució espacial i temporal sobre paràmetres de la vegetació i del sòl, així com de topografia, per a la comprensió d'aquests processos just després de l'incendi forestal més important ocorregut a les illes Balears. El monitoratge a llarg termini esdevindrà fonamental per avaluar els efectes derivats de l'incendi (i. e. erosió i pèrdua de nutrients) que es puguin observar quan la vegetació es trobi en un estadi major de creixement. Serà en aquest moment quan s'espera una forta competència pels recursos que es tradueixi en una disminució del vigor de la vegetació. És aquí que el desenvolupament de les tècniques interdisciplinàries i punteres exposades en aquest treball permetran l'aplicació d'una gestió post-incendi efectiva ambiental, social i econòmicament a través d'actuacions a curt i llarg termini.

Bibliografia

- ARNAU-ROSALÉN, Eva *et al.* (2008). "Analysis of soil surface component patterns affecting runoff generation. An example of methods applied to Mediterranean hillslopes in Alicante (Spain)". *Geomorphology*, vol. 101, núm. 4, p. 595-606. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.03.001
- BORSELLI, Lorenzo *et al.* (2008). "Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment". *CATENA*, vol. 75, p. 268-277. DOI: 10.1016/j.catena.2008.07.006
- BRIERLEY, Gary *et al.* (2006). "Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications". *Area*, vol. 38, p. 165-174. DOI: 10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x
- CAVALLI, Marco *et al.* (2013). "Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments". *Geomorphology*, vol. 188, p. 31-41. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007
- DAVENPORT, David W. *et al.* (1998). "Viewpoint: Sustainability of piñon-juniper ecosystems —A unifying perspective of soil erosion thresholds". *Journal of Range Management*, vol. 51, p. 231-240. DOI: 10.2307/4003212
- DOMÈNECH, Oriol (2015). "Incendis forestals a les Illes Balears: 25 anys de dades estadístiques per a la defensa integrada i la conservació del patrimoni natural", dins: SERVEI DE PROTECCIÓ D'ESPÈCIES [ed.]. *Llibre Verd de Protecció d'Espècies a les Balears*. Ciutat de Mallorca: Govern de les Illes Balears; Societat d'Història Natural de les Balears. *Monografies de la Societat d'Història Natural de Balears*, vol. 20, p. 487-494.

- DUNFORD, Richard *et al.* (2009). "Potential and constraints of unmanned aerial vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 30, p. 4915-4935.
- ESTRANY, Joan *et al.* (2015). "Wildfire effects on suspended sediment delivery in a Mediterranean catchment using fallout radionuclides as source tracers". *Land Degradation & Development*, en premsa. DOI: 10.1002/ldr.2462
- FONSTAD, Mark A. *et al.* (2013). "Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement". *Earth Surface Processes & Landforms*, vol. 38, p. 421-430. DOI: 10.1002/esp.3366
- GAGO, Jorge *et al.* (2015). "The UAVs challenge for water stress in agriculture". *Agricultural Water Management*, vol. 153, 9-19. DOI:10.1016/j.agwat.2015.01.020
- GUIJARRO, José A. (1986). *Contribución a la Bioclimatología de Baleares*. Tesis doctoral inèdita, Universitat de les Illes Balears, vol. 2, p. 282-301.
- HUNT, E. Raymond *et al.* (2010). "Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring". *Remote Sensing*, vol. 2, núm. 1, p. 290-305.
- JAIN, Vikrant; Sampat K. TANDON (2010). "Conceptual assessment of (dis)connectivity and its application to the Ganga River dispersal System". *Geomorphology*, vol. 118, p. 349-358. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.02.002
- JOHNSON, Lee *et al.* (2003). "Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV". *Proceedings of the International Symposium of Remote Sensing Environment*. 10-14 Novembre, Honolulu, Hawaii.
- LANE, Stuart N.; Keith S. RICHARDS (1997). "Linking river channel form and process: Time, space and causality revisited". *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 22, núm. 3, p. 249-260.
- LELONG, Camile *et al.* (2008). "Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots". *Sensors*, vol. 8, p. 3557-3585. DOI: 10.3390/s8053557
- LÓPEZ-SORIA, Lluís; Carles CASTELL (1992). "Comparative genet survival after fire in woody Mediterranean species". *Oecologia*, vol. 91, núm. 4, p. 493-499.
- LUDWIG, John A. *et al.* (2007). "Leakiness: A new index for monitoring the health of arid and semiarid landscapes using remotely sensed vegetation cover and elevation data". *Ecological Indicators*, vol. 7, p. 442-454. DOI:10.1016/j.ecolind.2006.05.001
- MAY, Robert (1977). "Thresholds and breakpoints in ecosystems with a multiplicity of stable states". *Nature*, vol. 269, p. 471-477. DOI: 10.1038/269471a0.
- MESSENZEHL, Karoline *et al.* (2014). "Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Mütschans, Swiss National Park-linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling". *Geomorphology*, vol. 221, p. 215-229. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.05.033
- MICHAELIDES, Katerina; John WAINWRIGHT (2002). "Modelling the effects of hillslope-channel coupling on catchment hydrological response". *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 27, p. 1441-1457. DOI: 10.1002/esp.440
- NEBIKER, Stephan *et al.* (2010). "Rich point clouds in virtual globes – A new paradigm in city modeling?" *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 34, núm. 6, p. 508-517. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2010.05.002
- OKIN, Gregory S. *et al.* (2009). "Do Changes in Connectivity Explain Desertification?" *BioScience*, vol. 59, núm. 3, p. 237-244.
- QUIÑONERO-RUBIO, Juan M. *et al.* (2013). "Development and application of a multi-factorial sediment connectivity index at the catchment scale". *Cuadernos de Investigación Geográfica*, vol. 39, núm. 2, p. 203-223. DOI: 10.18172/cig.1988
- RIBA, Miquel (1997). "Effects of cutting and rainfall pattern on resprouting vigour and growth of *Erica arborea* L.". *Journal of Vegetation Science*, vol. 8, núm. 3, p. 401-404.
- SACO, Patricia M.; Mariano MORENO DE LAS HERAS (2013). "Ecogeomorphic coevolution of semiarid hillslopes: Emergence of banded and striped vegetation patterns through

- interaction of biotic and abiotic processes". *Water Resources Research*, vol. 49.1, p. 115-126. DOI: 10.1525/bio.2009.59.3.8
- SCHEFFER, Marten *et al.* (2001). "Catastrophic shifts in ecosystems". *Nature*, vol. 413, p. 591-596. DOI: 10.1038/35098000
- ÚBEDA, Xavier; Jorge MATAIX-SOLERA (2008). "Fire effects on soil properties: A key issue in forest ecosystems". *CATENA*, vol. 74, núm. 3, p. 175-176. DOI: 10.1016/j.catena.2008.05.006
- ULLMAN, Shimon (1979). "The interpretation of structure from motion". *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. B 203, p. 405-426. DOI: 10.1098/rspb.1979.0006
- VERICAT, Damià *et al.* (2009). "Accuracy assessment of aerial photographs acquired using lighter-than-air blimps: low-cost tools for mapping river corridors". *River Research and Applications*, vol. 25, 985-1000. DOI: 10.1002/rra.1198
- WAINWRIGHT, John *et al.* (2011). "Linking environmental régimes, space and time: Interpretations of structural and functional connectivity". *Geomorphology*, vol. 126, p. 387-404. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.07.027
- WILCOX, B. P. *et al.* (2003). "Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: Effects of scale and disturbance". *Ecological Monographs*, vol. 73, p. 223-239. DOI: 10.1890/0012-9615
- WU, Ben *et al.* (2000). "Fragmentation and changes in hydrologic function of tiger bush landscapes, south-west Niger". *Journal of Ecology*, vol. 88, p. 790-800. DOI: 10.1046/j.1365-2745.2000.00491.x