



## Sinèrgia Energia – Territori

Transició socioecològica de l'agricultura metropolitana de Barcelona. Factors estratègics pel planejament del territori



Projecte CP 6.1.3a

Desembre 2017

## Direcció

Joan Marull

## Autors

Joan Marull

Claudio Cattaneo

Enric Tello

## Tècnics

Francesc Coll

Manel Pons

## Agraïments

Aquest treball ha estat realitzat per l'Àrea d'Ecologia i Territori de l'Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans de Barcelona. Ha rebut el suport de l'Àrea Metropolitana de Barcelona i dels projectes de recerca HAR2012-38920-C02-02 '*Sustainable farm systems and transitions in agricultural metabolism: social inequality and institutional changes in Spain*' finançat pel Ministerio de Economía y Competitividad, i SSHRC- 895-2011-1020 '*Sustainable farm systems: long-term socio-ecological metabolism in western agriculture*' finançat pel Social Sciences and Humanities Research Council of Canada.

## Índex

1.	Introducció de l'estudi.....	2
1.1.	Marc general.....	2
1.2.	Justificació del treball.....	4
1.3.	Posicionament conceptual .....	5
1.4.	Metabolisme social.....	7
1.5.	Matriu territorial.....	9
1.6.	Hipòtesi de partida .....	11
1.7.	Planejament territorial .....	13
2.	Aproximació metodològica .....	14
2.1.	Plantejament metodològic .....	14
2.2.	Indicadors d'eficiència energètica.....	16
2.3.	Indicadors de la matriu territorial .....	18
2.4.	Model energia-territori a escala regional.....	21
2.5.	Model energia-territori a escala local.....	23
2.6.	Informació en el model energia-territori .....	25
3.	Resultats preliminars .....	27
3.1.	Mètriques del paisatge i biodiversitat.....	27
3.2.	Mètriques del paisatge i planejament .....	30
3.3.	Model energia-territori a Catalunya .....	32
3.4.	Model energia-territori a la província de Barcelona.....	38
3.5.	Model energia-territori al Vallès .....	42
4.	Aplicació a la metròpoli .....	44
4.1.	Plantejament del treball.....	44
4.2.	Anàlisi multi-EROI .....	45
4.2.1.	EROIs econòmics .....	45
4.2.2.	EROIs agroecològics .....	45
4.3.	Anàlisi multi-escalar .....	50
4.3.1.	Usos del sòl i ramaderia .....	50
4.3.2.	Treballadors i ramaderia.....	53
4.3.3.	Relació entre bens fons i fluxos d'energia .....	56
4.4.	Anàlisi energia-territori .....	62
4.4.1.	Dades empíriques de biodiversitat .....	62
4.4.2.	Metabolisme i territori.....	66
4.4.3.	Relació entre metabolisme, territori i biodiversitat .....	72
5.	Conclusions principals .....	76

## 1. Introducció de l'estudi

### 1.1. Marc general

L'Àrea Metropolitana de Barcelona està introduint en el seu planejament territorial la noció fonamental de que els espais oberts constitueixen una infraestructura verda proveïdora de tot un seguit de serveis ecosistèmics dels quals en depèn tant la qualitat de vida de la gent que habita l'espai construït, com la possibilitat de desenvolupar una economia més circular i sostenible que el model econòmic actual.

El procés de debat que s'ha dut a terme en moltes metròpolis del món per concretar aquest nou enfocament de la interdependència entre l'espai construït i l'espai obert – especialment en relació a l'agricultura periurbana-, també ha posat de manifest la necessitat de conèixer i avaluar les interaccions que es donen, o es podrien donar, entre els dos sistemes del territori metropolità<sup>1</sup>.

En la [Figura 1](#) es representa un esquema conceptual de la possible contribució dels espais oberts en el sistema socioecològic metropolità. Inclou les següents dimensions: metabolisme social (energia i materials); conservació del territori (recursos i biodiversitat); qualitat dels ecosistemes (patrons i processos); canvi global (usos del sòl i clima); i serveis ecosistèmics (regulació i provisió). Totes aquestes dimensions dels espais oberts estan interrelacionades entre elles i amb l'espai construït.

S'ha arribat a un clar consens que el repte d'incloure la infraestructura verda per estructurar funcionalment la xarxa de ciutats, requereix comptabilitzar els fluxos de matèria i energia que es mouen en ambdues direccions, i estudiar com aquest bescanvi socio-metabòlic configura unes determinades estructures d'usos del sòl que s'expressen en paisatges que han de proveir d'uns serveis ecosistèmics vitals per la metròpoli.

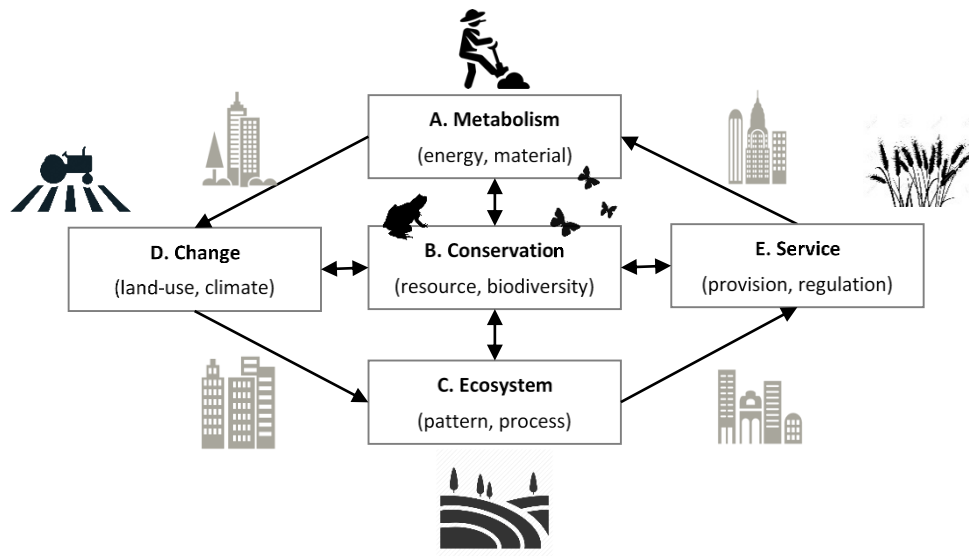
Per entomar aquest repte, l'Àrea Metropolitana de Barcelona està impulsant una línia de recerca sobre la sinèrgia entre energia i territori, que desenvolupa l'Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans de Barcelona mitjançant diversos projectes de recerca competitius. El document que teniu a les mans, pretén explicar les darreres aportacions científiques sobre la transició socioecològica de l'agricultura metropolitana, i la identificació de factors estratègics pel planejament del territori.

Una qüestió de fons sobre el sistema metropolità: Quin ha de ser el paper de l'agricultura –com infraestructura verda, articuladora de la xarxa de ciutats, proveïdora de serveis ecosistèmics i d'una economia més circular?

---

<sup>1</sup> Marull, J.; Tello, E.; Pino, J.; Mallarach, J.M. 2008. El tratamiento del territorio como sistema. Criterios ecológicos y metodologías paramétricas de análisis. *Ciudad y Territorio* 157, 439-453.

**Figura 1** Esquema conceptual de la contribució dels espais oberts en el sistema socioecològic metropolità. Inclou metabolisme social –energia i materials (A), conservació del territori –recursos i biodiversitat (B), qualitat dels ecosistemes –patrons i processos (C), canvi global –usos del sòl i clima (D) i serveis ecosistèmics –regulació i provisió (E). Es destaca la importància de la infraestructura verda per estructurar funcionalment la xarxa de ciutats. Aquest treball contribueix principalment en A, B i C.



Font: Elaboració pròpia a partir de Cardinale et al. 2012<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Cardinale, B.J., Duffy, J.E., Gonzalez, A., Hooper, D.U., Perrings, Ch., Venail, P., Nar-wani, A., Mace, G., Tilman, D., Wardle, D.A., Kinzig, A.P., Daily, G.C., Loreau, M., Grace, J.B., Larigauderie, A., Srivastava, D.S., Naeem, S., 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486, 59–67.

## 1.2. Justificació del treball

En el present treball desenvolupem un aspecte pràcticament inèdit del metabolisme social, com és la seva relació amb el sistema metropolità de Barcelona. Es proposa un model energia-territori, aplicable a escala regional i local. Aquest model s'analitza a nivell d'usos del sòl, es vincula amb l'ecologia del paisatge, s'aprofundeix en el paper cabdal de l'agricultura periurbana i, finalment, es donen directrius pel planejament territorial.

El creixement urbà, l'abandonament rural i una agricultura intensiva –que tracta de mantenir-se econòmicament viable optant per formes no integrades en el territori metropolità- tenen un alt impacte socioambiental

El propòsit del treball és doncs debatre els darrers avanços d'una nova metodologia que anomenem Anàlisi Integrada Energia-Territori, així com la seva aplicació a Catalunya i, més en concret, la regió metropolitana de Barcelona, com a cas d'estudi dels projectes de recerca en curs. Presentarem, de forma sintètica, els criteris i mètodes que sustenten aquesta anàlisi integrada de la configuració històrica dels nostres paisatges bio-culturals, a diferents escales espacials i temporals.

És fonamental conèixer la història i la multi-funcionalitat dels nostres paisatges bio-culturals –producte d'una subtil interrelació home-natura- per a poder abordar un planejament territorial més sostenible

El treball es desenvolupa en el marc dels projectes de recerca competitius: SSHRC-CRSH-895-2011-1020 “*Sustainable farm systems: long-term socio-ecological metabolism in western agriculture*” finançat pel Social Sciences and Humanities Research Council of Canada; i HAR2015-69620-C2-1-P “*¿Sistemas agrarios sustentables? Una interpretación histórica de la agricultura en España desde la perspectiva biofísica*” finançat pel Ministerio de Economía y Competitividad.

De quina manera el coneixement de les relacions entre el metabolisme social, els canvis en els usos del sòl i el funcionament ecològic del paisatge pot ser útil en el planejament del territori metropolità?

En aquest document, primer comentarem breument, i de la forma més entenedora possible, els fonaments teòrics en que basarem la anàlisi energia-territori (apartat 1). Per a tot seguit explicar els consecutius passos del desenvolupament metodològic (apartat 2), evitant en tot cas els formalismes matemàtics (se citaran els articles científics més rellevants, per a qui pugui estar interessat en aprofundir-hi). A continuació, comentarem alguns resultats preliminars d'especial interès a l'àmbit d'estudi (apartat 3), i posteriorment aplicarem a la metròpoli els criteris i mètodes desenvolupats en els projectes de recerca (apartat 4). Finalment, exposarem les conclusions del treball (apartat 5), destacant alguns elements estratègics que pot aportar l'ecologia a la planificació del territori metropolità de Barcelona, i clourem esmentant la nova recerca en curs.

### 1.3. Posicionament conceptual

En el darrer segle hem vist un creixement sense precedents en la producció mundial d'aliments associat a la pèrdua de biodiversitat (és el “*food-biodiversity dilemma*”)<sup>3</sup>. Per abordar aquest dilema, considerem els agro-ecosistemes com el resultat de la inversió per la societat de determinades quantitats d'energia i informació que, al seu torn, modifiquen els patrons i processos que tenen lloc a la matriu territorial i sostenen la biodiversitat.

La nostra aproximació conceptual es basa en el treball de Morowitz, segons el qual un flux d'energia a través de l'espai és condició necessària i suficient per a generar una estructura organitzada, encara que sigui efímera en el temps (Figura 2)<sup>4</sup>. Segons Gladyshev, l'estructura organitzada dels essers vius els hi permet mantenir la seva informació (i allunyar-se de l'equilibri termodinàmic), transferint energia amb la màxima eficiència<sup>5</sup>. Aquest concepte és aplicable al territori entès com a sistema.

Com apuntava Schrödinger, la vida no és aliena a les lleis de la termodinàmica ja que incrementa la seva complexitat exportant entropia a l'entorn<sup>6</sup>. Un ésser viu consisteix en una estructura organitzada amb múltiples cicles energètics relacionats gràcies a una base espai-temporal heterogènia (on els outputs d'un cicle són els inputs del següent). Segons Ulanowicz, el model termodinàmic dels essers vius té estretes similituds amb els ecosistemes<sup>7</sup>: quan un sistema es fa més complex l'és més rentable augmentar la seva informació interna que no pas l'energia externa per augmentar la seva eficiència.

La sostenibilitat del territori està directament relacionada amb la complexitat i inversament amb la dissipació d'energia (entropia)

El principi de Margalef diu que la successió en els ecosistemes tendeix a una disminució en la seva taxa de renovació<sup>8</sup>. L'energia combinada amb la informació incrementa la diversitat, no la producció d'uniformitat. D'aquí deriva el concepte d'explotació: la diversitat espacial i la jerarquització de fluxos d'energia i informació generen estructures organitzades on els llocs més complexos i estables exploten els més simples i productius.

Finalment, Gonzalez-Bernáldez apuntava que en els agro-ecosistemes tradicionalment s'ha buscat un equilibri entre explotació i conservació, mitjançant la localització espacial de diversos gradients d'explotació humana en el territori: són els paisatges en mosaic<sup>9</sup>.

<sup>3</sup> Cardinale, B.J., Duffy, J.E., Gonzalez, A., Hooper, D.U., Perrings, Ch., Venail, P., Nar-wani, A., Mace, G., Tilman, D., Wardle, D.A., Kinzig, A.P., Daily, G.C., Loreau, M., Grace, J.B., Larigauderie, A., Srivastava, D.S., Naeem, S., 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486, 59–67.

<sup>4</sup> Morowitz, H.J., 2002. *The Emergence of Everything: How the World Became Complex*. Oxford University Press, 209 pp.

<sup>5</sup> Gladyshev, G.P., 1999. On thermodynamics, entropy and evolution of biological systems: what is life from a physical chemist's viewpoint. *Entropy* 1, 9–20.

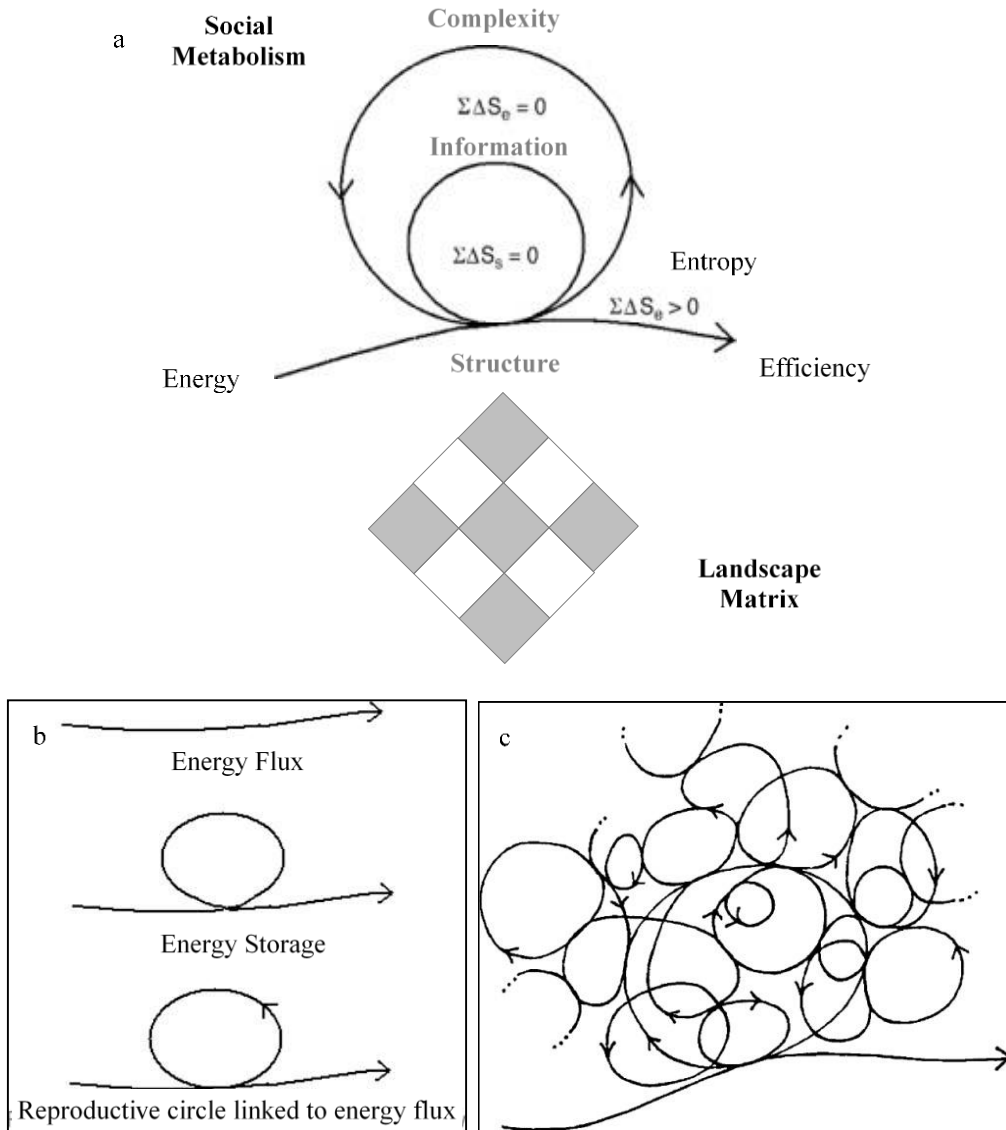
<sup>6</sup> Schrödinger, E., 1944. *What is Life?* Cambridge University Press, 178 pp.

<sup>7</sup> Ulanowicz, R.E., 2003. Some steps towards a central theory of ecosystem dynamics. *Computational Biology and Chemistry* 27, 523–530.

<sup>8</sup> Margalef, R., 1991. *Teoría de los sistemas ecológicos*. Universidad de Barcelona, Barcelona, 290 pp.

<sup>9</sup> González-Bernáldez, F. 1981. *Ecología y paisaje*. Editorial Blume, 250 pp.

**Figura 2** A partir d'un esquema conceptual de la vida, es presenta un model de la relació entre el metabolisme social i la matriu territorial (a). La vida tracta d'escapar de la tendència universal a l'equilibri termodinàmic, incrementant la seva complexitat interna i exportant entropia a l'entorn (b). Un ésser viu consisteix en una estructura espai-temporal dinàmica amb múltiples cicles metabòlics relacionats (c). El model termodinàmic d'organisme presenta fortes similituds amb els agro-ecosistemes.



Mathematical formula proposed by Clausius:  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ . Free energy increase ( $\Delta G$ ) is related with enthalpy change ( $\Delta H$ ), temperature ( $T$ ) and entropy increase ( $\Delta S$ ). According to Boltzmann,  $T\Delta S$  measures the disorder produced in a system.

Font: Marull et al., 2009<sup>10</sup> a partir de Ho i Ulanowicz, 2005<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> Marull, J. 2009. El tractament del territori com a sistema. Metabolisme social, transformació del paisatge i ordenació del territori. Nogué, J.; Puigbert, L.; Bretcha, G. (eds.) Indicadors del paisatge. Reptes i Perspectives. Observatori del Paisatge de Catalunya. *Plecs de Paisatge - Eines 1*, 152-179.

<sup>11</sup> Ho, M-W; Ulanowicz, R. 2005. Sustainable systems as organisms?" *BioSystems* 82, 39-51.



#### 1.4. Metabolisme social

La complexitat en el territori apareix inevitablement, conseqüència de la dissipació d'energia en l'espai, amb la consegüent construcció d'estructures organitzades, i la successió històrica regida per la selecció adaptativa. L'estratègia d'augmentar la complexitat sense incrementar el sistema dissipatiu<sup>12</sup> esdevé l'alternativa al model de desenvolupament que basa la seva competitivitat en augmentar la perifèria dissipativa<sup>13</sup>.

Quan l'augment d'energia dissipada disminueix la complexitat del sistema, la degradació ambiental és el resultat de l'estratègia de malbaratament de recursos coneguda en ecologia com el "principi de la Regna Roja"

Es fa palesa la necessitat de solucions paisatgístiques, en tant que expressions territorials del metabolisme que qualsevol societat manté amb els sistemes naturals que la sustenten. La relació entre energia i espai constitueix un excel·lent punt de partida per modelitzar les relacions entre la societat i el seu entorn<sup>14</sup>.

Per entendre com incideix la societat en l'organització de l'espai cal esclarir conceptualment i formular quantitativament la relació entre les entrades d'energia externa i les dimensions que caracteritzen els motius de distribució, és a dir, l'estructura funcional de la matriu territorial.

Les ciutats són sistemes oberts allunyats de l'equilibri que s'autoorganitzen a canvi de produir increments en els nivells de desordre (entropia) en el medi que les envolta. És a dir, importen energia del medi i la dissipen en formes menys eficients (pèrdua estructural del paisatge, contaminació, disminució de la biodiversitat, etc.).

Sense una important entrada d'energia els sistemes urbans no podrien augmentar el seu ordre intern, per això són estructures altament dissipatives<sup>15</sup>. Les ciutats depenen d'uns fluxos energètics que provenen, en últim terme, dels sistemes naturals que les sostenen. Les infraestructures verdes han de ser, per tant, elements essencials en l'estructura del sistema metropolità.

Al seu torn, els sistemes naturals es basen principalment en l'energia solar per renovar-se i aporten recursos sempre limitats. A escala global, des de la dècada dels noranta es consumeix per sobre dels ingressos, cosa que redueix el capital natural. Per tant, cal garantir els mecanismes de renovabilitat energètica dels sistemes autòtrofs de què depenem i mantenir-ne la informació organitzada, per tal d'evitar explotar-los per sobre de la seva capacitat de càrrega.

Reduir la pressió sobre l'entorn no ha de comportar necessàriament la reducció de la complexitat urbana, cosa que en comprometria el seu futur. La disminució de l'energia

---

<sup>12</sup> És el "principi de la Reina Roja" (en al·lusió al personatge d'Alicia en terra de meravelles de Lewis Carroll, 1865): córrer cada cop més per continuar en el mateix lloc.

<sup>13</sup> Rueda, S. 1995. Ecologia urbana. Barcelona i la seva regió metropolitana com a referents. Editorial Beta, 272 pp.

<sup>14</sup> Margalef, R. 1993. Teoría de los sistemas ecológicos. Universitat de Barcelona, 290 pp.

<sup>15</sup> Terradas, J. 2001. Ecologia urbana. Barcelona: Editorial Rubes, 128 pp.

en un sistema compromet l'organització interna. Però s'ha demostrat que els sistemes més simples depenen més fortament dels nexes energètics i, a mesura que els sistemes es fan més complexos, l'energia té un paper cada cop més secundari en benefici de la informació, que passa a ser el nexa organitzador principal del sistema.

Augmentar la informació organitzada és, per tant, l'estratègia metropolitana per competir en el món, i hauria de substituir bona part de l'estratègia basada en el consum de recursos. Una major complexitat proporciona avantatge en relació amb altres sistemes més simplificats (la informació es multiplica, l'energia es suma) ja que augmenta la funcionalitat i l'estabilitat de la ciutat.

Un model urbà que incorpori un augment de l'organització interna i, alhora, una disminució de la pressió sobre l'entorn sembla necessari per resoldre el repte de la sostenibilitat, i més encara en l'actualitat, en què la capacitat transformadora de l'home es dona a una escala espacio-temporal sense precedents històrics.

En aquest sentit, repensar el territori metropolità en termes sistèmics és absolutament oportú, perquè els mecanismes funcionals (fluctuacions de població, recursos naturals i energètics) estan canviant encara més ràpid que la mateixa estructura del paisatge.

Que els sistemes urbans no siguin autosuficients no significa que resultin insostenibles, són dos conceptes diferents que sovint es confonen<sup>16</sup>. Les ciutats són heteròtrofes, importen energia, aigua, aliments i matèries primeres d'una ampla perifèria, fet que les converteix en importants elements vertebradors, o desestructuradors, segons els casos, de la matriu territorial. Fet que fa l'agricultura periurbana un element fonamental.

D'altra banda, les ciutats exporten grans quantitats de residus, esdevenen importants agents contaminants de la seva perifèria i contribueixen significativament al canvi global. Tot això comporta la necessitat de considerar la xarxa de sistemes urbans una estructura socioecològica dinàmica que cal gestionar globalment, d'una manera integrada amb el seu entorn. El potencial de relacionar el metabolisme rural i urbà està encara poc explorat.

En definitiva, els espais oberts han de ser elements destacats en un estudi funcional complet de la matriu territorial, principalment en relació amb els fluxos d'energia, i matèria, el que és equivalent, i com aquests fluxos metabòlics canvien en el temps. D'altra banda, cal relacionar l'estructura espacial dels factors físics, biològics, socials i econòmics amb el funcionament global del sistema urbà. Finalment, convé que ens plantejem de quina manera la nostra comprensió del concepte de territori com a sistema pot ajudar-nos a millorar la qualitat de la nostra vida i la del medi del què depenem.

Comprendre la relació entre el metabolisme social i l'estructura funcional del paisatge és fonamental pel tractament del territori com a sistema. El potencial de relacionar el metabolisme rural i urbà està encara molt poc explorat

---

<sup>16</sup> Folch, Ramon (ed.). 2003. El territorio como sistema. Conceptos y herramientas de ordenación. Diputació de Barcelona, 570 pp.

## 1.5. Matriu territorial

L'ecologia del paisatge aporta criteris i mètodes per a quantificar l'estructura funcional de la matriu territorial, mitjançant la relació entre patrons, processos i biodiversitat.

Partim de la matriu territorial, una estructura organitzada amb cobertes del sòl distribuïdes en tessel·les (Figura 3). Les cobertes “naturals” tenen els seus propis processos ecològics i espècies d'interior. Quan hi ha diferents tessel·les en contacte apareixen altres processos ecològics intencs, però també ecotons i espècies de marge. A més, quan es produeix una pertorbació (‘natural’ o antròpica) apareixen altres processos com ara els de successió amb espècies colonitzadores. I en agro-ecosistemes apareixen espècies d'espais oberts.

En conseqüència, en paisatges en mosaic (amb tessel·les heterogènies i ben connectades) podem trobar: espècies d'interior, espècies de marge, espècies d'espais oberts, i espècies que aprofiten processos de successió o exploten hàbitats més productius. Per a caracteritzar els patrons i processos que permeten aquesta biodiversitat utilitzem principalment dues mètriques: la heterogeneïtat del paisatge ( $H'$ ; *Shannon-Wiener Index*) i la connectivitat del paisatge (ECI; *Ecological Connectivity Index*)<sup>17</sup>.

Aquestes mètriques del paisatge permeten avaluar l'impacte ambiental de projectes urbanístics i d'infraestructures<sup>18</sup>, així com la intensificació agrícola o l'abandonament rural, en el funcionament ecològic del territori. S'ha demostrat que cal passar del model clàssic en ecologia del paisatge (basat en conservar espais naturals) al “model continu del paisatge” (on l'agricultura és fonamental), especialment en territoris metropolitanans<sup>19</sup>.

El paisatge que hem rebut i cal preservar –amb nous coneixements– és un mosaic d'usos del sòl interconnectats, que aporten una elevada eficiència territorial –aquesta herència ha permès mantenir els processos socioecològics

L'aplicació de l'ecologia del paisatge té tres implicacions fonamentals en el planejament del territori: La hipòtesi de la pertorbació intermèdia (o l'equilibri entre explotació i conservació)<sup>20</sup>; el debat anomenat *land-sharing vs land sparing* (o la conservació d'espais naturals vs espais humanitzats)<sup>21</sup>; i l'avaluació del “cost territorial de la sostenibilitat” (o la contribució dels agro-ecosistemes en l'ordenament del territori)<sup>22</sup>.

<sup>17</sup> Marull, J.; Mallarach, L.M. 2005. A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona Metropolitan Area. *Landscape and Urban Planning* 71, 243-262.

<sup>18</sup> Marull, J.; Pino, J.; Mallarach, L.M.; Cordobilla, M.J. 2007. A Land Suitability Index for Strategic Environmental Assessment in metropolitan areas. *Landscape and Urban Planning* 81, 200-212.

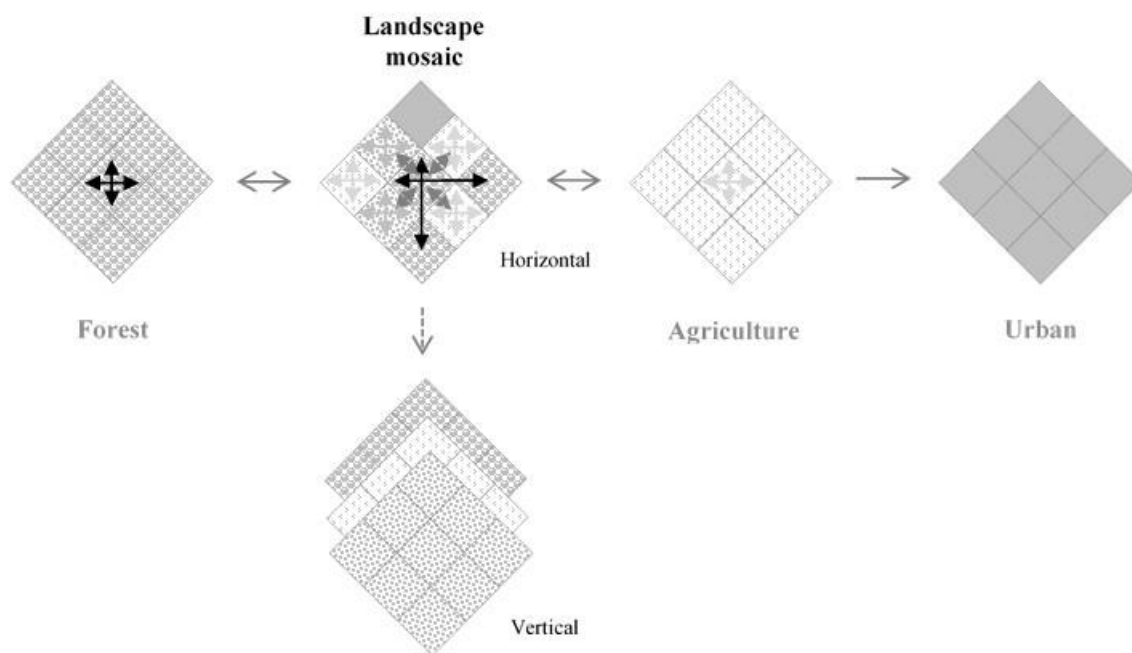
<sup>19</sup> Pino, J.; Marull, J. 2012. Ecological networks: are they enough for connectivity conservation? A case study in the Barcelona Metropolitan Region (NE Spain). *Land Use Policy* 29, 684-690.

<sup>20</sup> Marull, J.; Tello, E.; Fullana, N.; Murray, I.; Jover, G.; Font, C.; Coll, F.; Domene, E.; Decoli, T.; Leoni, V. 2015. Long-term socio-ecological transition at different spatial scales: Exploring the intermediate disturbance hypothesis in cultural landscapes (Mallorca, 1856-2012). *Biodiversity and Conservation* 24 (13), 3217-3251.

<sup>21</sup> Tschardtke, T.; Klein, A.M.; Kruess, A.; Steffan-Dewenter, I.; Carsten Thies, C. 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity-ecosystem service management. *Ecology Letters* 8, 857-874.

<sup>22</sup> Guzmán, G.I.; González de Molina, M.; Alonso, A.M. 2011. The land cost of agrarian sustainability. An assessment. *Land use Policy* 28 (4), 825-835.

Figura 3 Esquema de l'estructura i funcionalitat de la matriu territorial en el context dels paisatges culturals.



Font: Elaboració pròpia

## 1.6. Hipòtesi de partida

Es presenta un esquema conceptual de la hipòtesi de la pertorbació intermèdia, aplicada a paisatges culturals com els de la Mediterrània (Figura 4). Aquesta hipòtesi relaciona l'estructura funcional de la matriu territorial (complexitat del paisatge) amb l'energia disponible per a mantenir els processos ecològics i la biodiversitat (pertorbació antròpica), mitjançant diferents usos del sòl (planificació del territori).

Una pertorbació intermèdia i desigual en el territori permet mantenir paisatges heterogenis (hàbitats més complexos i estables, junt amb hàbitats més simples i productius) que sustenten els processos ecològics i la biodiversitat

L'esquema conceptual (Figura 4) relaciona la biodiversitat que acull la matriu territorial (mesurada mitjançant mètriques d'estructura i funcionalitat del paisatge –Le; *Landscape Ecology Metric*) amb la pertorbació antròpica (mesurada amb l'apropiació de la producció primària neta –HANPP; *Human Appropriation of Net Primary Production*).

En l'esquema (Figura 4), es mostra com els mosaics agro-silvo-pastorals permeten mantenir els processos ecològics i la biodiversitat; i com una degradació en l'estructura funcional del paisatge pot produir-se per la intensificació agrícola i el desenvolupament urbanístic, o per l'abandonament rural i la transició forestal (especialment en paisatges culturals amb molt temps d'antiguitat).

Per a comprovar que les mètriques emprades no son un artefacte sinó que reflecteixen la biodiversitat, recentment s'han portat a terme diversos casos d'estudi a diferents escales espacials, amb dades empíriques que recolzen la hipòtesi del 'land-sharing' en paisatges culturals: utilitzant ocells a escala regional<sup>23</sup> ( $\gamma$  diversitat); analitzant orquídies a escala de paisatge<sup>24</sup> ( $\beta$  diversitat), o estudiant papallones a escala local<sup>25</sup> ( $\alpha$  diversitat).

Estudis recents han demostrat empíricament la hipòtesi de la pertorbació intermèdia en relació a la biodiversitat, el que posa en qüestió les polítiques clàssiques de planejament del territori

Aquests estudis recents (veure apartat 3.1) mostren la importància de la perspectiva històrica (es a dir, entendre les transicions socioecològiques) per a la correcta gestió dels agro-ecosistemes, la conservació de la biodiversitat i el planejament territorial.

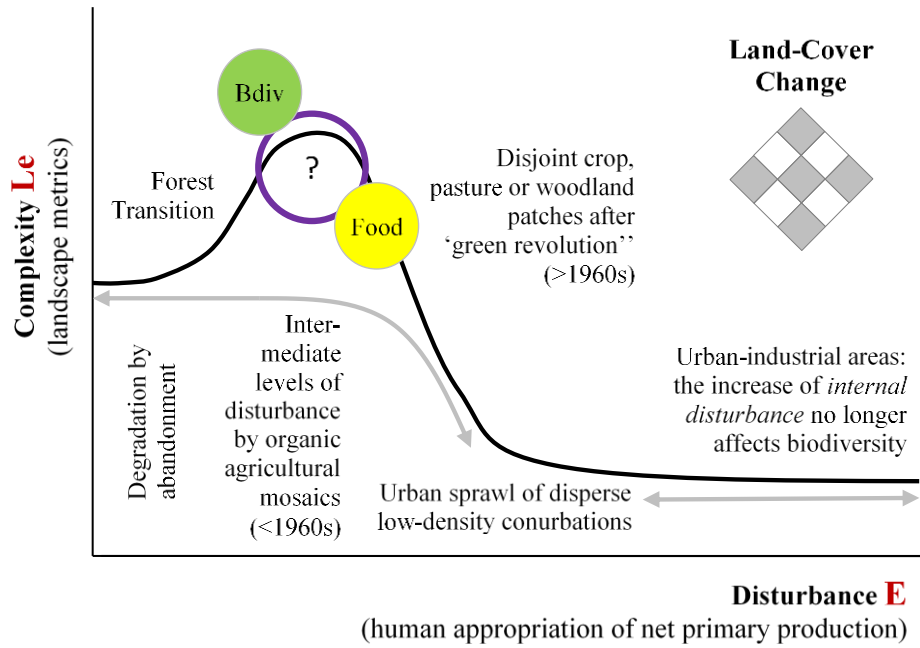
---

<sup>23</sup> Marull, J.; Font, C.; Tello, E.; Fullana, N.; Domene, E.; Pons, M. 2016. Towards an Energy-Landscape Integrated Analysis? Exploring the links between socio-metabolic disturbance and landscape ecology performance (Mallorca, Spain, 1956-2011). *Landscape Ecology* 31, 317-336.

<sup>24</sup> Marull, J.; Tello, E.; Wilcox, P.T. Coll, F.; Pons, M.; Warde, P.; Valdeperas, N.; Ollés, A.; 2014. Recovering the landscape history behind a Mediterranean edge environment (The Congost Valley, Catalonia, 1854–2005): The importance of agroforestry systems in biological conservation. *Applied Geography* 54, 1-17.

<sup>25</sup> Marull, J.; Otero, I.; Stefanescu, C.; Tello, E.; Coll, F.; Pons, M.; Diana, G. 2015. Exploring the links between forest transition and landscape changes in the Mediterranean. Can forest recovery lead to lower landscape quality? *Agroforestry Systems* 89 (4), 705-719.

Figura 4 Esquema de la hipòtesi de la Pertorbació Intermèdia – Complexitat, en el context d'un paisatge bio-cultural a la Mediterrània.



Font: Elaboració pròpia a partir de Marull et al. 2015<sup>26</sup>.

<sup>26</sup> Marull, J.; Tello, E.; Fullana, N.; Murray, I.; Jover, G.; Font, C.; Coll, F.; Domene, E.; Decoli, T.; Leoni, V. 2015. Long-term socio-ecological transition at different spatial scales: Exploring the intermediate disturbance hypothesis in cultural landscapes (Mallorca, 1856-2012). *Biodiversity and Conservation* 24 (13), 3217-3251.

### 1.7. Planejament territorial

El propòsit d'aquest treball és fer una reflexió sobre la necessitat de disposar d'indicadors que permetin quantificar el que anomenem eficiència territorial. Entenem per "eficiència territorial" les formes d'aprofitament econòmic de la matriu territorial que aconsegueixen satisfer les necessitats de les persones que hi viuen i mantenir, al mateix temps, l'estat ecològic dels seus paisatges<sup>27</sup>.

Un camí per obtenir aquests indicadors, i posar-los a prova, és mitjançant la reconstrucció històrica dels usos del sòl, aplicant-hi mètriques procedents de l'economia ecològica i de l'ecologia del paisatge, per tal d'assolir un millor coneixement de l'evolució dels paisatges més representatius i alhora identificar les principals forces motrius que els han originat, cosa que, al seu torn, ens ha de proporcionar conceptes i eines útils per a una ordenació més sostenible del territori (veure apartat 3.2)<sup>28</sup>.

Es parteix de la premissa que hi ha una associació complexa i canviant entre el metabolisme social i la sostenibilitat territorial. Tanmateix, en processos històrics oberts els nexes causals mai no són fàcils d'establir, ni poden entendre's de manera determinista<sup>29</sup>. Per això, és possible recuperar l'eficiència territorial en un nou context socioeconòmic, justament perquè qualsevol relació causa-efecte entre model econòmic i gestió territorial sempre ha estat més dèbil del que en un principi podria semblar.

Els estudis que aquí s'exposen pretenen comprendre millor els nexes entre els balanços energètics i la complexitat territorial, i proposar indicadors per a una ordenació més sostenible del territori, perquè aquests indicadors faciliten la integració transversal entre plans i programes agrícoles, ramaders, forestals, energètics, industrials, urbans i d'infraestructures en el disseny de les polítiques públiques.

També perquè poden contribuir a fer una avaluació ambiental estratègica més precisa, i a resoldre molts conflictes actuals que contraposen les prioritats ambientals amb el desenvolupament econòmic. En aquest sentit, parlem de planificació territorial sostenible quan als objectius socioeconòmics tradicionals s'hi incorporen objectius socioambientals i es considera la matriu territorial com a premissa ineludible per concretar les decisions espacials d'una planificació estratègica<sup>30</sup>.

Entendre el territori com un sistema socioecològic, complex i canviant, on totes les dimensions de la sostenibilitat estan interrelacionades, és essencial per la planificació urbanística i territorial

<sup>27</sup> Marull, J.; Tello, E.; Pino, J.; Mallarach, J.M. 2008. El tratamiento del territorio como sistema. Criterios ecológicos y metodologías paramétricas de análisis. *Ciudad y Territorio* 157, 439-453.

<sup>28</sup> Marull, J.; Pino, J.; Tello, E., Cordobilla, M.J. 2010. Social metabolism, landscape change and land-use planning in the Barcelona Metropolitan Region. *Land Use Policy* 2, 497-510.

<sup>29</sup> Prigogine, I. 1997. The end of certainty: time, chaos and the new laws of nature. Nova York: Free Press.

<sup>30</sup> Marull, J.; Pino, J. (eds). 2008. La matriu territorial. Criteris ecològics i mètodes paramètrics per al tractament del territori com a sistema, la seva planificació i avaluació ambiental estratègiques. IERMB ([https://iermb.uab.cat/wp-content/uploads/2015/11/Matriu\\_Territorial.pdf](https://iermb.uab.cat/wp-content/uploads/2015/11/Matriu_Territorial.pdf)) 421pp.

## 2. Aproximació metodològica

### 2.1. Plantejament metodològic

La idea original en la que es fonamenta el treball es va publicar fa uns anys en un estudi previ<sup>31</sup>. En aquest article es suggeria la hipòtesi d'una relació complexa i canviant entre el metabolisme social, els canvis en els usos del sòl i la funcionalitat ecològica del paisatge. Encara que la hipòtesi de partida encara no es demostrava empíricament, ja s'exposaven els fonaments teòrics de la nostra recerca. Actualment hem desenvolupat dues formes per integrar energia i territori, amb base estadística i matemàtica (Figura 5):

- La primera, que anomenem Model de Pertorbació Intermèdia – Complexitat (IDC; *Intermediate Disturbance – Complexity*)<sup>32</sup>, estudia la relació entre el metabolisme social, les cobertes del sol i l'estructura funcional del paisatge (veure apartat 2.4). El model es basa en l'apropiació de la producció primària neta en el territori (HANPP; *Human Appropriation of Net Primary Production*)<sup>33</sup> i es pot aplicar a escala regional.
- La segona, que anomenem Anàlisi Integrada Energia – Territori (ELIA; *Energy – Landscape Integrated Analysis*)<sup>34</sup>, estudia la relació entre la quantitat d'energia que es reinverteix en el territori, la forma com aquesta energia es redistribuïda i, finalment, la impressió de dita energia en el paisatge (veure apartat 2.5). El model es basa en el balanç entre el retorn per la societat i l'energia invertida en el sistema (EROI; *Energy Return of Investment*)<sup>35</sup> i es pot aplicar a escala local.

Els nostres paisatges són el producte de l'energia (treball) i la informació (coneixement) que imprimeix la societat a la matriu territorial, per a treure'n un profit que ha de ser sostenible en el temps

Tot seguit s'expliquen les mètriques emprades per avaluar el metabolisme social (apartat 2.2) i l'estructura funcional del paisatge (apartat 2.2), per a continuació descriure en que consisteixen els models energia-territori que s'han desenvolupat (apartats 2.4 i 2.5), així com la seva utilitat per la gestió dels espais oberts i el planejament del territori.

---

<sup>31</sup> Marull, J.; Pino, J.; Tello, E., Cordobilla, M.J. 2010. Social metabolism, landscape change and land-use planning in the Barcelona Metropolitan Region. *Land Use Policy* 2, 497-510.

<sup>32</sup> Marull, J.; Font, C.; Tello, E.; Fullana, N.; Domene, E.; Pons, M. 2016. Towards an Energy-Landscape Integrated Analysis? Exploring the links between socio-metabolic disturbance and landscape ecology performance (Mallorca, Spain, 1956-2011). *Landscape Ecology* 31, 317-336.

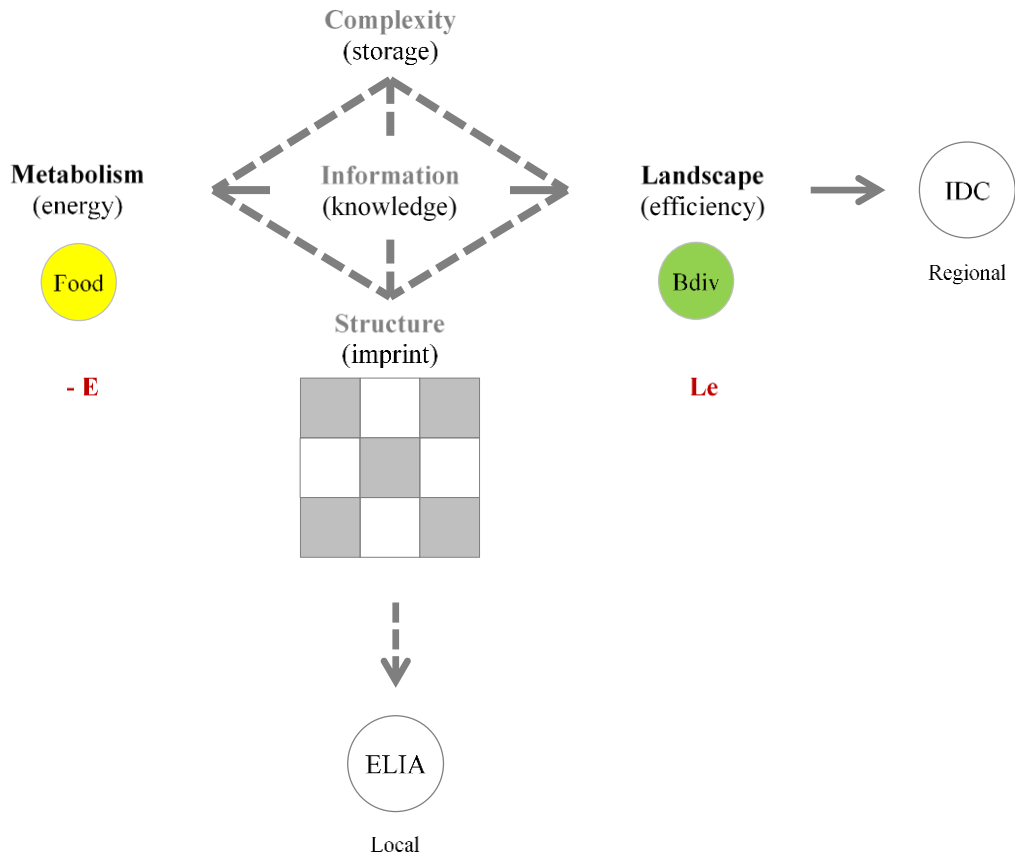
<sup>33</sup> Vitousek, P.M.; Ehrlich, P.R.; Ehrlich, A.H.; Matson, P.A. 1986. Human appropriation of the products of photosynthesis. *BioScience* 36 (6), 363-373.

<sup>34</sup> Marull, J.; Font, C.; Padró, R.; Tello, E.; Panazzolo, A. 2016. Energy–Landscape Integrated Analysis: A proposal for measuring complexity in internal agro-ecosystem processes (Barcelona Metropolitan Area, 1860-2000). *Ecological Indicators* 66, 30-46.

<sup>35</sup> Tello, E.; Galán, E.; Sacristán, V.; Cunfer, G., Guzmán, G.I.; González de Molina, M.; Krausmann, F.; Gingrich, S.; Padró, R.; Marco, I.; Moreno-Delgado, D. 2016. Opening the black box of energy throughputs in agroecosystems: a decomposition analysis of final EROI into its internal and external returns (the Vallès County Catalonia, c.1860 and 1999). *Ecological Economics* 121, 160-174.



Figura 5 Esquema de les dues metodologies proposades per avaluar la relació entre metabolisme social, canvis en els usos del sòl i propietats ecològiques del paisatge.



El Model de Pertorbació Intermèdia – Complexitat (IDC; *Intermediate Disturbance – Complexity*) és aplicable a escala regional; l'Anàlisi Integrada Energia – Paisatge (ELIA; *Energy – Landscape Integrated Analysis*) és aplicable a escala local. Ambdues metodologies es presenten en el context del dilema producció d'aliments – conservació de la biodiversitat.

Font: Elaboració pròpia.

## 2.2. Indicadors d'eficiència energètica

Ens basem en el marc teòric del metabolisme social, en particular la anàlisi multi-EROI (*Energy Return of Investment*)<sup>36</sup>. Considerem els agro-ecosistemes com cicles metabòlics entre natura i societat. Partim de la perspectiva de l'agricultor, a escala de paisatge.

Un EROI és un indicador que mesura l'eficiència en l'ús de l'energia. Els principals valors d'entàlpia (contingut d'energia) dels fluxos metabòlics (Figura 6) es comptabilitzen mitjançant: *Final Produce* (FP; biomassa que apropia la societat del sistema), *Biomass Reused* (BR; cicles metabòlics cabdals dins la matriu territorial), i *External Inputs* (EI; energia incorporada per la societat al sistema).

En l'enfocament EROI, la proporció de BR és una característica fonamental dels sistemes agroecològics, que tendeixen a evitar EI. En l'altre extrem, l'agricultura industrial i la ramaderia establada tendeixen minimitzar BR, reemplaçant-la amb EI. Per tant, analitzar els EROI pot evidenciar els perfil socio-metabòlics de la matriu territorial.

La anàlisi socio-metabòlica aplicada a l'agricultura ha d'expressar quelcom més que el cost energètic de la biomassa neta produïda en benefici de la societat (anàlisi input-output). També ha de proporcionar informació sobre els canvis estructurals i funcionals de l'agro-ecosistema, que poden afectar els bens fons i els serveis ecosistèmics que proporciona a la societat. Amb aquest objectiu, s'ha desenvolupat una proposta metodològica d'anàlisi multi-EROI<sup>37</sup>.

A partir dels fluxos metabòlics (Figura 6) podem calcular EROIs econòmics: *Final EROI* (FEROI; retorn a la societat de l'energia invertida), es compon (Figura 7) de *External Final EROI* (EFEROI; relació entre EI i FP) i *Internal Final EROI* (IFEROI; eficiència en que BR es transforma en FP). I anar més enllà mitjançant EROIs agroecològics: *Net Primary Production EROI* (NPPEROI; capacitat productiva de l'agro-ecosistema), *Agroecological Final EROI* (AFEROI; inversió d'energia necessària per obtenir biomassa per la societat), i *Biodiversity EROI* (BEROI; energia disponible per les cadenes tròfiques)<sup>38</sup>.

No obstant, altres factors, com l'absència de biocides o una matriu territorial funcional (com ara heterogènia i ben connectada), poden ser importants per explicar la biodiversitat.

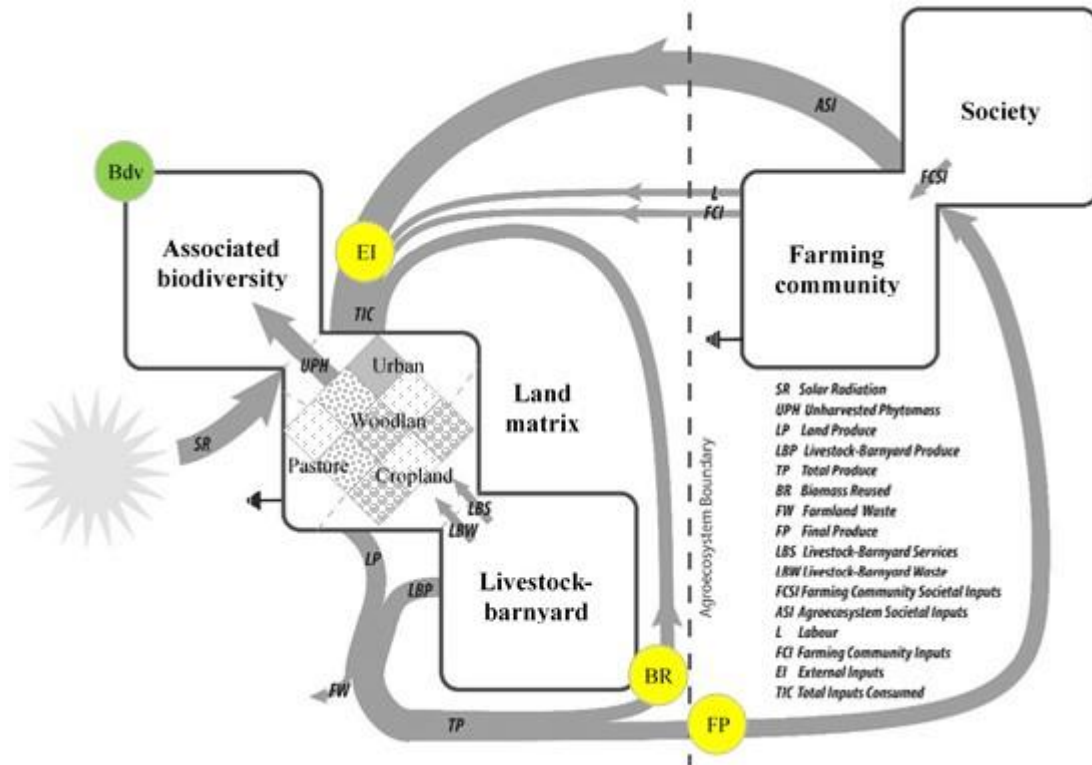
La anàlisi de les relacions metabòliques entre natura i societat permet apropar-nos al concepte d'eficiència territorial, és a dir, la qualitat del territori que proporciona benestar a la societat i qualitat ecològica als seus paisatges

<sup>36</sup> Tello, E.; Galán, E.; Sacristán, V.; Cunfer, G.; Guzmán, G.I.; González de Molina, M.; Krausmann, F.; Gingrich, S.; Padró, R.; Marco, I.; Moreno-Delgado, D. 2016. Opening the black box of energy throughputs in agroecosystems: a decomposition analysis of final EROI into its internal and external returns (the Vallès County Catalonia, c.1860 and 1999). *Ecological Economics* 121, 160-174.

<sup>37</sup> Guzmán, G.I.; González de Molina, M. 2015. Energy efficiency in agrarian systems from an agroecological perspective. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 39 (8), 925-952.

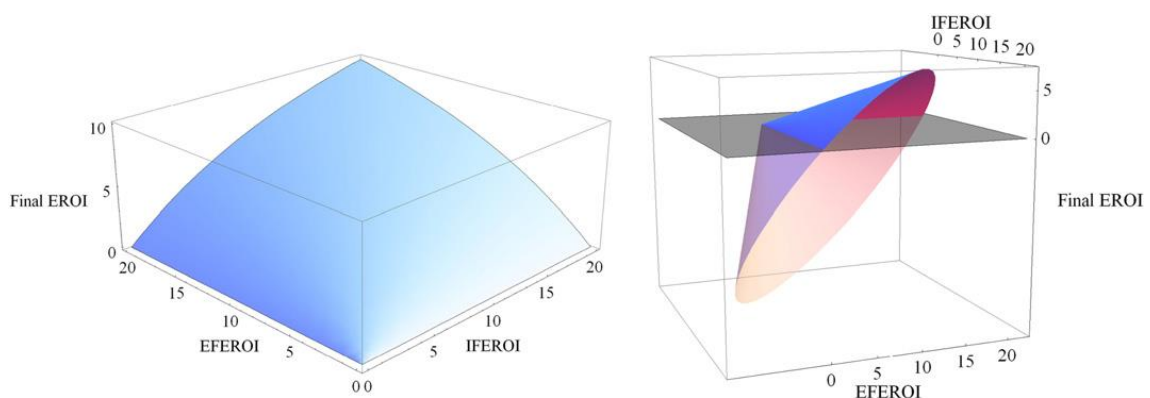
<sup>38</sup> Guzmán, G.I.; González de Molina, M.; Fernández, D.S.; Infante-Amate, J.; Aguilera, E. 2017. Spanish agriculture from 1900 to 2008: a long-term perspective on agroecosystem energy from an agroecological approach. *Regional Environmental Change* (on line).

Figura 6 Esquema conceptual del balanç (EROI; *Energy Return of Investment*) entre l'energia que inverteix la societat en la matriu territorial (EI; *External Inputs*) i el retorn a la mateixa societat (FP; *Final Produce*) com a serveis ecosistèmics de provisió. Es destaca la biomassa reutilitzada (BR; *Biomass Reused*) en una economia més circular.



Font: Elaboració pròpia a partir de Tello et al. 2016<sup>39</sup>. Adaptació des de l'ecologia del paisatge Figura 10.

Figura 7 Relació entre l'eficiència energètica mesurada com el retorn a la societat de l'energia invertida (FEROI; *Final EROI*) i els seus dos components: la relació entre l'energia externa i el producte final (EFEROI; *External Final EROI*), i l'eficiència en que la biomassa reutilitzada es transforma en producte final (IFEROI; *Internal Final EROI*).



Font: Tello et al. 2016.

<sup>39</sup> Tello, E.; Galán, E.; Sacristán, V.; Cunfer, G., Guzmán, G.I.; González de Molina, M.; Krausmann, F.; Gingrich, S.; Padró, R.; Marco, I.; Moreno-Delgado, D. 2016. Opening the black box of energy throughputs in agroecosystems: a decomposition analysis of final EROI into its internal and external returns (the Vallès County Catalonia, c.1860 and 1999). *Ecological Economics* 121, 160-174.

### 2.3. Indicadors de la matriu territorial

Si considerem el territori com un sistema complex, podem escollir un mètode ecosistèmic per estudiar-lo. D'acord amb aquesta premissa, la matriu territorial, i el paisatge, serien sistemes heterogenis, dinàmics, organitzats en nivells jeràrquics de complexitat que dependrien de la seva escala espai-temporal<sup>40</sup>.

Aquesta aproximació, emprada en l'ecologia del paisatge quantitativa, permet transferir les teories actuals sobre la matriu biofísica en eines útils per una planificació territorial més sostenible. La formulació matemàtica que s'hi associa permet formalitzar i acotar característiques importants i intuïtives del terreny. Les aproximacions conceptual i metodològica conflueixen, per tant, en el tractament del territori com a sistema<sup>41</sup>.

Un cop definida la matriu territorial, el mètode paramètric proposat (Taula 1) pretén interactuar per comprovar l'efecte que diferents plans transformadors poden produir sobre el medi biofísic. La matriu territorial s'ha definit, precisament, com la base resultant de les interrelacions entre la matriu biofísica i les transformacions degudes a l'activitat humana. Per tant, adoptem com a base conceptual el nou "model continu de paisatge"<sup>42</sup>. En la percepció del planificador ve a ser l'espai que es proposa modificar, per generar la matriu territorial de la transformació següent.

La incorporació de la funcionalitat de la matriu territorial en plans i programes ha produït resultats interessants però desiguals en el planejament i la normativa, sobretot per la manca d'un marc regulador que els donés coherència i una coordinació administrativa insuficient<sup>43</sup>. D'altra banda, l'ecologia del paisatge ha trobat dificultats a l'hora d'establir una relació sòlida entre patrons espacials i processos funcionals, en part perquè l'activitat humana estableix els seus propis esquemes topològics en el territori<sup>44</sup>.

La irrupció de l'ecologia del paisatge ha presenciats desenvolupaments sense precedents, en la teoria i en la pràctica, que han portat l'anàlisi espacial i la modelització territorial al front de la investigació ecològica<sup>45</sup>. L'aplicació d'aquestes metodologies, a diferents escales de treball, ha demostrat la seva interacció, tant conceptual com tècnica, amb planificadors i polítics. No obstant això, és necessari conèixer les limitacions dels índexs territorials en l'avaluació ambiental estratègica de plans i programes<sup>46</sup>.

---

<sup>40</sup> Prigogine I, Stengers I (1984) Order out of Chaos: Man's new dialogue with nature. Bantam Books, 349.

<sup>41</sup> Marull J, Tello E, Pino J, Mallarach JM (2008) El tratamiento del territorio como sistema. Criterios ecológicos y metodologías paramétricas de análisis. *Ciudad y Territorio* 157, 439-453.

<sup>42</sup> Fischer J, Lindenmayer DB (2006) Beyond fragmentation: the continuum model for fauna research and conservation in human modified landscapes. *Oikos* 112, 473-480.

<sup>43</sup> Mallarach JM, Marull J, Pino J (2008) Aportacions de l'índex de connectivitat ecològica a la planificació territorial i l'avaluació ambiental estratègica, en el context de les recerques i les polítiques de connectivitat ecològica a Catalunya. *Documents d'Anàlisi Geogràfica* 51, 113-128.

<sup>44</sup> Li H, Wu J (2004) Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology* 19, 389-399.

<sup>45</sup> Wu J, Hobbs R (2002). Key issues and research priorities in landscape ecology: An idiosyncratic synthesis. *Landscape Ecology* 17 (4), 355-365.

<sup>46</sup> Opdam P, Foppen R, Vos C (2001) Bridging the gap between ecology and spatial planning in landscape ecology. *Landscape Ecology* (16), 767-779.

És important remarcar que la selecció d'indicadors presentats per avaluar l'estat ecològic de la matriu territorial (Taula 1), únicament aborden un aspecte de l'avaluació ambiental: el seu impacte des del punt de vista de la sostenibilitat territorial. Bona part dels impactes associats al consum de recursos o les emissions, s'exporten fora del territori i han de ser avaluats mitjançant altres mètodes.

Les metodologies per avançar en aquesta direcció han de ser transdisciplinàries, i ja estan disponibles en els camps de l'economia ecològica i l'ecologia del paisatge. D'una banda, l'economia ecològica està desenvolupant la comptabilitat de fluxos i balanços biofísics d'energia i materials, així com l'apropiació humana dels ecosistemes<sup>47</sup>. D'altra banda, l'ecologia del paisatge ha desenvolupat diverses mètriques<sup>48</sup> que permeten avaluar les relacions entre l'estructura del paisatge i la seva funcionalitat ecològica, cosa que, cada cop més, es perfila com una bona aproximació sistèmica a la sostenibilitat territorial.

Ambdues aproximacions estan col·laborant des de fa més d'una dècada a Catalunya<sup>49</sup>, mitjançant l'aplicació d'índexs territorials a la cartografia històrica d'usos del sòl, de manera que obren la porta a una perspectiva dinàmica, a la vegada ecològica i econòmica, de la transformació de la matriu territorial.

L'enllaç entre economia ecològica i ecologia del paisatge connecta amb el gir que estan experimentant arreu del món les polítiques de conservació de la biodiversitat. L'Estratègia Mundial de la Conservació (1980) ja va introduir la idea que la "conservació" implica l'ús sostenible, prudent i responsable dels recursos i serveis ambientals de tot el territori, i no es pot confondre amb la preservació d'unitats aïllades sense intervenció humana.

Tal com proclama el Conveni Europeu del Paisatge (2000), del qual parteix la llei catalana aprovada, "tot el territori és paisatge": des d'espais urbans o infraestructures, fins a espais naturals protegits, passant pels mosaics agro-forestals que històricament han tingut un paper essencial en la conservació<sup>50</sup>. Uns i altres s'han d'integrar en un gradient diversificat d'intervenció humana i han de mantenir el funcionament ecològic del paisatge (veure apartat 3.2) per tal de garantir uns "serveis ecosistèmics" que no tenen substituïts.

La matriu territorial és la base resultant de les interrelacions entre la matriu biofísica i les transformacions degudes a l'activitat humana. L'enllaç entre l'economia ecològica i l'ecologia del paisatge permet la seva avaluació

---

<sup>47</sup> Constanza R et al. (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387 (15), 253-260.

<sup>48</sup> McGarigal K, Cushman S, Stafford, Susan (2000) *Multivariate Statistics for Wildlife and Ecology Research*. New York: Springer-Verlag.

<sup>49</sup> Marull J, Pino J, Tello E, Mallarach JM (2006) Análisis estructural y funcional de la transformación del paisaje agrario en el Vallès durante los últimos 150 años (1853-2004): relaciones con el uso sostenible del territorio". *Áreas. Revista Internacional de Ciencias Sociales* 25, 105-126.

<sup>50</sup> Agnoletti M (ed.) (2002) *Il paesaggio agro-forestale toscano. Strumenti per l'analisi, la gestione e la conservazione*. Florència: Arsia.

**Taula 1** Indicadors per avaluar l'estat ecològic de la matriu territorial. Selecció de mètriques de canvi de cobertes del sòl, estructura i funcionalitat del paisatge.

Typology	Indicator	Description	Calculation
Land Cover Change <sup>51</sup>	Land Use Change (LUC)	Measures the cell average of the land use change of each pixel: 0 (no change); 1 (change).	Three stability regimes could be obtained: stable (LUC = 0-0.2); semi-stable (LUC = 0.2-0.4); non-stable (LUC = 0.4-1). The land use change regressive LUC <sub>r</sub> measures the change to urban and agricultural land uses. The land use progressive LUC <sub>p</sub> measures the change to grassland land uses.
	Pressure (P)	Measures the percentage of pixels that change to urban or agriculture land use for each cell: 0 (no change); 1 (total change).	Agriculture pressure P <sub>a</sub> : low (P <sub>a</sub> = 0-0.25); medium (P <sub>a</sub> = 0.0.25-0.5); high (P <sub>a</sub> = 0.5-0.75); very high (P <sub>a</sub> = 0.75-1). Urban pressure P <sub>u</sub> : low (P <sub>u</sub> = 0-0.05); medium (P <sub>u</sub> = 0.05-0.1); high (P <sub>u</sub> = 0.1-0.2); very high (P <sub>u</sub> = 0.2-1).
	Naturalness (N)	Measures the degree of preservation of differentiated habitat for natural species	Five levels can be obtained: high (N = 5; natural habitats), medium (N= 4; disturbed natural habitats and shelterbelts), low (N = 3, pastures), very low (N = 2; crops and recently mowed areas), and null (N = 1; urban areas, roads and railways).
Landscape Structure <sup>52</sup>	Largest Patch Index (LPI)	Measures the grain thickness of the landscape.	Surface of the largest polygon in each cell.
	Edge Density (ED)	Measures the potential exchanges between land covers / land uses.	Total length of perimeters (of the polygons of each land cover) in relation to the surface area of the cell.
	Polygon Density (PD)	Measures the landscape fragmentation.	Number of polygons (of all the covers taken together).
	Effective Mesh Size (EMS) <sup>53</sup>	Measures the inverse of the extent of fragmentation.	$EMS = \sum(A_i^2) * 1000 / \sum(A_i)$ Where A <sub>i</sub> s the area of each polygon.
	Shannon Index (H) <sup>54</sup>	Measures the land cover diversity.	$H = \sum(P_i * \ln P_i)$ Where P <sub>i</sub> is the proportion of land matrix occupied by each type of cover.
Landscape Functionality <sup>55</sup>	Landscape Metric Index (LMI) <sup>56</sup>	Based on the landscape's structure capacity, as affected by human activities, to support organisms and ecological processes.	$LMI = 1 + 9 (\gamma_i - \gamma_{min}) / (\gamma_{max} - \gamma_{min})$ ; $\gamma = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$ Were $\gamma_i$ is the sum of the indicators for each point in the region, while $\gamma_{min}$ and $\gamma_{max}$ are the minimum and maximum values, respectively, in the study area under consideration. I <sub>1</sub> = potential relation; I <sub>2</sub> = ecotonic contrast; I <sub>3</sub> = human impact; I <sub>4</sub> = vertical complexity.
	Ecological Connectivity Index (ECI) <sup>57</sup>	Assesses the functionality of the land matrix according to its ability to host and connect the horizontal flows of energy, matter and information which sustain biodiversity.	$ECI = 10 - 9 \ln(1 + (x_i - x_{min})) / \ln(1 + (x_{max} - x_{min}))^3$ Were $x_i$ is the adapted cost-distance value in a pixel, $x_{max}$ are the maximum and $x_{min}$ are the minimum adapted cost-distance values on a given area.

<sup>51</sup> Bender DJ, Contreras TA, Fahrig L (1998) Habitat loss and population decline: a meta-analysis of the patch size effect. *Ecology* 79, 517-533.

<sup>52</sup> Forman RTT (1995) Land Mosaics. The Ecology of Landscapes and Regions. Cambridge University Press, Cambridge.

<sup>53</sup> Jaeger JAG (2000) Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology* 15, 115-130.

<sup>54</sup> Shannon CE (1948) A Mathematical Theory of Communication. The Bell System Technical Journal 27.

<sup>55</sup> Opdam P, Steingröver E, van Rooij S (2006) Ecological networks. A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes. *Landscape and Urban Planning* 75, 322-332.

<sup>56</sup> Marull J, Pino J, Mallarach JM, Cordobilla MJ (2007) A land suitability index for strategic environmental assessment in metropolitan areas. *Landscape and Urban Planning* 81, 200-12.

<sup>57</sup> Marull J, Mallarach JM (2005) A new GIS methodology for assessing and predicting landscape and ecological connectivity: Applications to the Metropolitan Area of Barcelona (Catalonia, Spain). *Landscape and Urban Planning* 71, 243-62.



## 2.4. Model energia-territori a escala regional

Resultats previs (veure apartat 3.1), que relacionen paisatges culturals i biodiversitat, suggereixen anar més enllà en el coneixement de les relacions entre energia i territori. La nostra metodologia comença amb un model a escala regional, que anomenem de Pertorbació Intermèdia – Complexitat (IDC; *Intermediate Disturbance –Complexity*)<sup>58</sup>.

El model energia-territori permet avaluar els nivells òptims de pertorbació que proveeixen d'aliments a la societat tot garantint la qualitat ecològica del paisatge –mosaic d'usos i energia disponible- a escala regional

En la seva versió més senzilla (Figura 8), el model IDC utilitza la heterogeneïtat del paisatge (mitjançant H') i la pertorbació antròpica (mitjançant HANPP), a partir d'una matriu territorial amb diferents cobertes del sòl.

La Figura 8 mostra la distribució de valors teòrica per les variables H' i HANPP, considerant 2 o 3 tipus de cobertes del sòl. El model presenta: una distribució combinada no rectangular (totes dues variables depenen de les cobertes del sòl i tenen un horitzó de successos possible que és el que dibuixa la figura); una relació no-lineal (el que permet entendre millor les transicions socioecològiques); i una regió de major resiliència potencial (on cal major pertorbació per modificar l'estructura del paisatge).

La Figura 9 pretén expressar de forma senzilla la contribució conceptual i metodològica més rellevant del present treball:

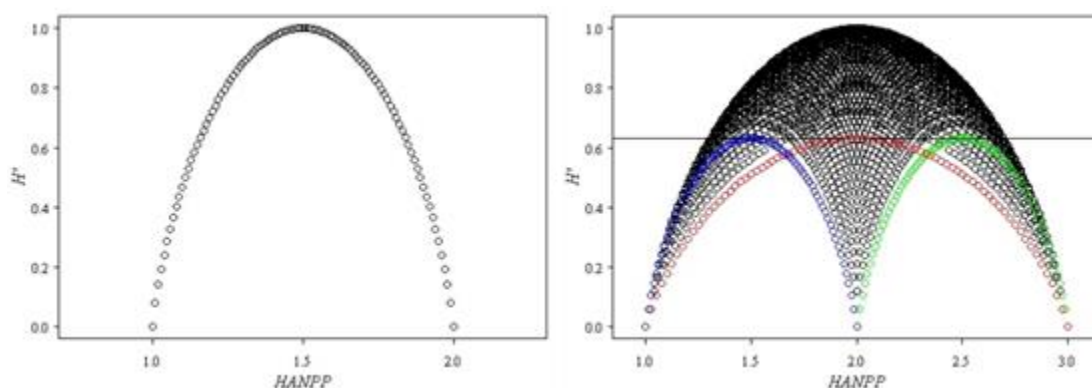
- D'una banda, la complexitat del paisatge (calculada mitjançant Le; mètrica que mesura el grau en el que la matriu territorial presenta cobertes del sòl heterogènies i ben connectades) no sempre és una bona predictora de la biodiversitat, ja que Le no valora l'energia disponible en les diferents cobertes del sòl.
- D'altra banda, la pertorbació antròpica (calculada mitjançant 1-HANPP; que mesura l'energia disponible en la matriu territorial un cop apropiada per la societat) tampoc no és sempre una bona predictora de la biodiversitat, perquè aquesta biomassa disponible per les cadenes tròfiques pot prendre un valor homogeni o heterogeni en el territori, aspecte que HANPP no valora.
- El model IDC combina ambdues aproximacions, de forma que pretén calcular l'apropiació d'energia òptima (HANPP) tot mantenint una bona estructura funcional del paisatge (Le). Aquesta aproximació incideix directament en el dilema entre producció d'aliments i preservació de la biodiversitat.

El model IDC és d'utilitat en regions metropolitanes amb diferents gradients de pertorbació antròpica. Especialment, el model posa en valor l'agricultura periurbana i la seva multi-funcionalitat com infraestructura verda

---

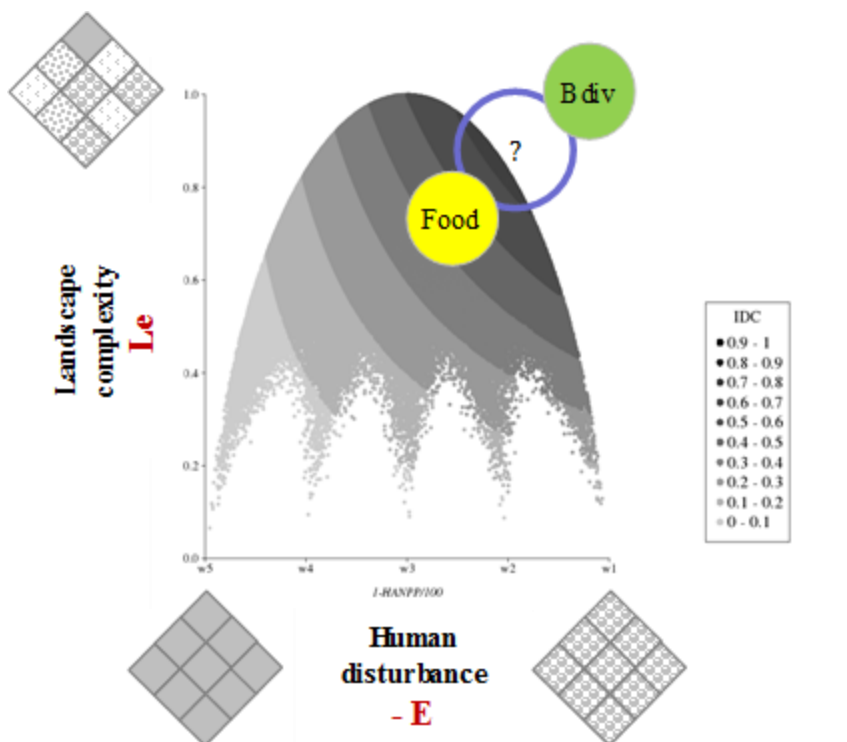
<sup>58</sup> Marull, J.; Font, C.; Tello, E.; Fullana, N.; Domene, E.; Pons, M.; Galán, E. 2016. Towards an Energy-Landscape Integrated Analysis? Exploring the links between socio-metabolic disturbance and landscape ecology performance (Mallorca, Spain, 1956-2011). *Landscape Ecology* 31, 317-336.

Figura 8 Model teòric simplificat de la relació entre complexitat del paisatge ( $H'$ ; Shannon-Wiener Index) i perturbació antròpica (HANPP; *Human Appropriation of Net Primary Production*) per a dos i tres cobertes del sòl.



Font: Marull et al. 2016<sup>59</sup>.

Figura 9 Model teòric de Pertorbació Intermèdia – Complexitat (IDC; *Intermediate Disturbance – Complexity*). S'inclou l'anomenat dilema entre producció d'aliments i conservació de la biodiversitat.



Font: Marull et al. 2018<sup>60</sup>.

<sup>59</sup> Marull, J.; Font, C.; Tello, E.; Fullana, N.; Domene, E.; Pons, M.; Galán, E. 2016. Towards an Energy-Landscape Integrated Analysis? Exploring the links between socio-metabolic disturbance and landscape ecology performance (Mallorca, Spain, 1956-2011). *Landscape Ecology* 31, 317-336.

<sup>60</sup> Marull, J.; Tello, E.; Bagaria, G.; Font, X.; Cattaneo, C.; Pino, J. 2018. Exploring the links between social metabolism and biodiversity distribution across landscape gradients: A regional-scale contribution to the land-sharing versus land sparing debate. *Science of the Total Environment* (online), 1272-1285.



## 2.5. Model energia-territori a escala local

El model energia-territori a escala regional (apartat 2.4), suggereix un paper rellevant de l'agricultura en el manteniment de la biodiversitat i la planificació del territori. Per anar més enllà en l'estudi del funcionament sostenible dels agro-ecosistemes dins la matriu territorial es proposa un model a escala local, que anomenem Anàlisi Integrada Energia – Territori (ELIA; *Energy – Landscape Integrated Analysis*)<sup>61</sup>.

Un aspecte clau dels agro-ecosistemes és que certa quantitat d'energia obtinguda de la matriu territorial és reutilitzada i redistribuïda dins del propi sistema, com a inversió per a poder garantir els bens i serveis en el futur

El model ELIA pretén demostrar la contribució dels fluxos interns d'energia i informació per a explicar l'eficiència territorial dels agro-ecosistemes, en quant a producció de bens i serveis per la societat, tot mantenint la qualitat ecològica del paisatge. Les principals aportacions metodològiques del model son: l'aplicació de la teoria de “xarxes ecològiques” i la “territorialització dels fluxos d'energia”.

Es presenta un esquema conceptual dels fluxos d'energia en un agro-ecosistema (Figura 10). Des de la perspectiva de l'ecologia del paisatge es consideren tres subsistemes (forestal, agrícola i ramader –en verd, vermell i violeta, respectivament). Es diferencia la presència dels fluxos d'energia segons es donen dins la matriu territorial (en gris, línia horitzontal) o fora d'ella. I finalment es té en compte si aquests fluxos d'energia entren (esquerra) o surten (dreta) dels diferents cicles metabòlics (en gris, línia vertical).

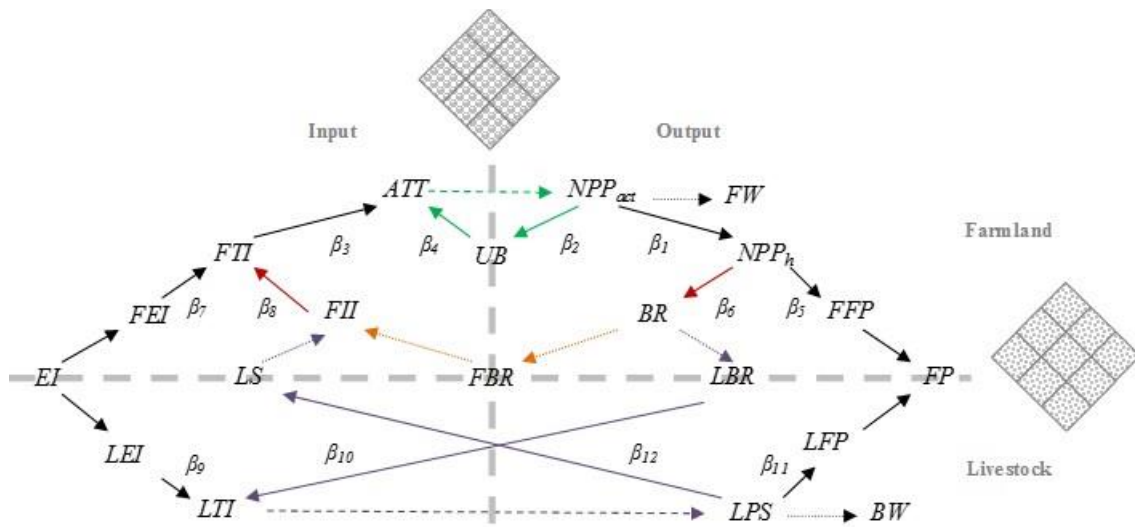
A partir dels coeficients input-output (Figura 10), el model mostra la interacció entre la proporció d'energia reutilitzada (E; *Energy Storage*) i redistribuïda (I; *Energy Information*) dins el sistema (Figura 11).

- Es considera que hi ha major informació (I) en un sistema equilibrat entre inputs i outputs: cal més “coneixement” per a redistribuir convenientment l'energia (E) entre els diferents subsistemes (quan l'output d'un cicle metabòlic és l'input del següent). Aquest és el cas d'un sistema agro-silvo-pastoral, o paisatge en mosaic.
- Els residus i els inputs no renovables es consideren “recursos fora de lloc” i, per tant, una pèrdua d'informació en el sistema (que penalitza el valor de I).
- En els altres dos extrems trobem: un sistema recol·lector (amb una apropiació de la producció primària neta propera a 0); i un sistema industrial (amb una reutilització d'energia tendent a 0). Òbviament aquests dos sistemes també requereixen informació, però d'altre tipus del que mesurem amb I.
- En resum, per a mantenir els tres subsistemes (forestal, agrícola i ramader) es requereix cert balanç entre explotació i conservació.

L'energia reutilitzada i redistribuïda (economia circular) s'imprimeix en el paisatge afectant el funcionament ecològic del territori

<sup>61</sup> Marull, J.; Font, C.; Padró, R.; Tello, E.; Panazzolo, A. 2016. Energy–Landscape Integrated Analysis: A proposal for measuring complexity in internal agro-ecosystem processes (Barcelona Metropolitan Area, 1860-2000). *Ecological Indicators* 66, 30-46.

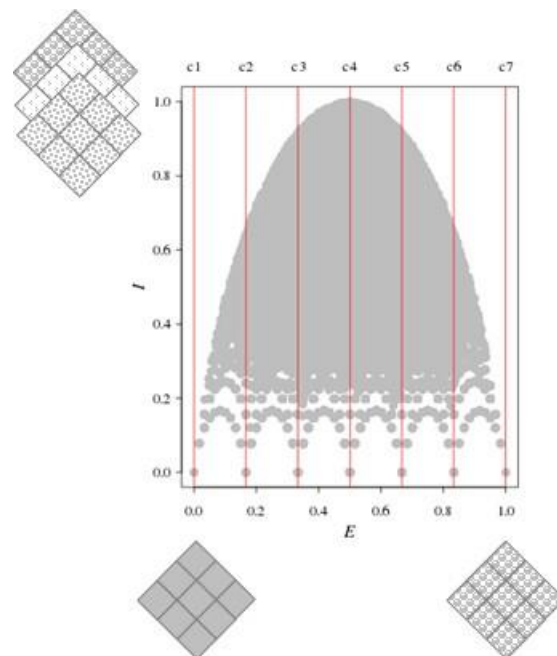
Figura 10 Esquema conceptual dels fluxos d'energia en un agro-ecosistema, des de la perspectiva de l'ecologia del paisatge.



Nota: Actual Net Primary Production (NPP<sub>act</sub>); Unharvested Biomass (UB); Harvested Net Primary Production (NPP<sub>h</sub>); Biomass Reused (BR); Farmland Biomass Reused (FBR); Livestock Biomass Reused (LBR); Farmland Final Produce (FFP); External Input (EI); Farmland External Input (FEI); Livestock External Input (LEI); Livestock Total Input (LTI); Livestock Produce and Services (LPS); Livestock Final Produce (LFP); Livestock Services (LS); Final Produce (FP); Agro-ecosystem Total Turnover (FTT); Farmland Total Input (FTI); Farmland Internal Input (FII).  $\beta$ 's are the incoming-outgoing coefficients.

Font: Marull et al. 2016<sup>62</sup>.

Figura 11 Relació entre l'energia reinvertida (E; Energy Storage) i redistribuïda (I; Energy Information) dins la matriu territorial.



Font: Marull et al. 2016.

<sup>62</sup> Marull, J.; Font, C.; Padró, R.; Tello, E.; Panazzolo, A. 2016. Energy–Landscape Integrated Analysis: A proposal for measuring complexity in internal agro-ecosystem processes (Barcelona Metropolitan Area, 1860–2000). *Ecological Indicators* 66, 30–46.

## 2.6. Informació en el model energia-territori

Segons el nostre model conceptual, el territori entès com a sistema no és aliè a les lleis de la termodinàmica, ja que incrementa la seva complexitat exportant entropia a l'entorn.

Quan un sistema, com ara el territori, es fa més complex, l'és més rentable augmentar la seva informació interna que no pas importar energia externa per augmentar la seva eficiència

El model termodinàmic dels agro-ecosistemes presenta estretes similituds amb el dels éssers vius (veure apartat 1.3). Un agro-ecosistema consisteix en una estructura organitzada amb múltiples cicles energètics relacionats gràcies a una base espai-temporal heterogènia (on els outputs d'un cicle són els inputs del següent).

La interacció entre l'energia reinvertida (E; *Energy Storage*) i l'energia redistribuïda (I; *Energy Information*) dins la matriu territorial resulta fonamental per entendre el funcionament ecològic dels agro-ecosistemes. Per explicar-ho gràficament, podríem visualitzar-ho amb quatre supòsits: i) un gran cicle metabòlic (alt E, baix I), ii) molts cicles metabòlics interconnectats grans (alt E, alt I), iii) molts cicles metabòlics interconnectats petits (baix E, alt I), iv) un cicle metabòlic petit (baix E, baix I). El supòsit ii) seria el de major capacitat estructuradora de la matriu territorial (L).

La [Figura 12](#) representa un esquema teòric dels valors que pot prendre la interacció entre l'energia reinvertida (E; mesurada com la proporció d'energia que retorna a la matriu territorial) i l'energia redistribuïda (I; mesurada com la equi-diversitat de cicles metabòlics dins del sistema), així com on es donen els valors més alts de la capacitat d'impressió de l'energia (L) en l'estructura del paisatge (en color). En altres paraules, es mostra la relació teòrica òptima de la interacció E·I per aconseguir maximitzar els valors ELIA. Es a dir, per a mantenir la major eficiència entre energia i territori.

Degut a la importància de la informació com a vincle cabdal entre energia i territori, s'ha modificat l'indicador original d'informació (I) d'una forma interessant. No per mesurar exactament la equi-diversitat de cicles metabòlics dins el sistema, d'acord amb la Teoria de la Informació, sinó per a mesurar la optimització dels cicles metabòlics (I\*) amb el propòsit de mantenir els serveis i bens dels agro-ecosistemes en el temps ([Figura 12](#))<sup>63</sup>.

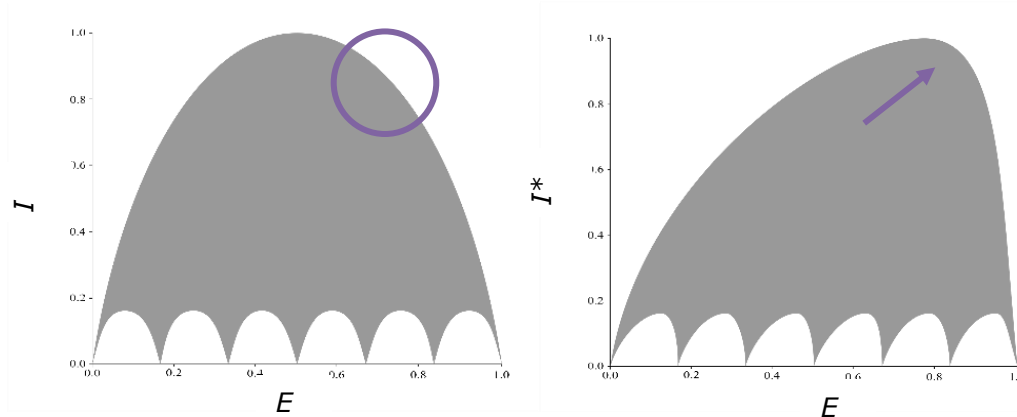
El model energia-territori ressaltava la importància de l'herència bio-cultural (el coneixement de la relació home-natura tramés al llarg de les generacions) en explicar l'eficiència del paisatge

Finalment, la [Figura 13](#) mostra un esquema tridimensional de la relació entre l'energia reinvertida (E; *Energy Storage*), l'energia redistribuïda (I; *Energy Information*) i l'energia impresa (L; *Landscape Complexity*) en la matriu territorial.

---

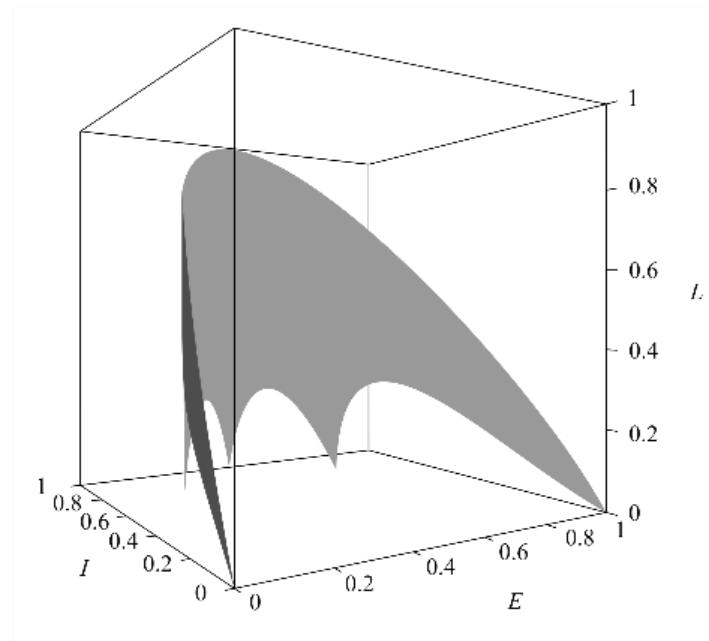
<sup>63</sup> Marull, J.; Font, C. 2018. The Energy–Landscape Integrated Analysis (ELIA) of Agroecosystems. In Fraňková, E.; Haas, W.; Singh, S.J. Socio-Metabolic Perspectives on the Sustainability of Local Food Systems. Springer (in press).

**Figura 12** Esquema teòric de la relació entre l'energia reinvertida ( $E$ ; *Energy Storage*) i l'energia redistribuïda a la matriu territorial, segons la Teoria de la Informació ( $I$ ; *Energy Information*) i segons l'agroecologia ( $I^*$ ; *Agro-ecological Information*). En color es mostren on es donen els valors més alts en el model Anàlisi Integrada Energia – Territori (ELIA; *Energy – Landscape Integrated Analysis*).



Font: Marull and Font. 2018<sup>64</sup>.

**Figura 13** Esquema tridimensional de la relació entre l'energia reinvertida ( $E$ ; *Energy Storage*), l'energia redistribuïda ( $I$ ; *Energy Information*) i l'energia impresa ( $L$ ; *Landscape Complexity*) en la matriu territorial.



Font: Marull and Font. 2018.

<sup>64</sup> Marull, J.; Font, C. 2018. The Energy–Landscape Integrated Analysis (ELIA) of Agroecosystems. In Fraňková, E.; Haas, W.; Singh, S.J. *Socio-Metabolic Perspectives on the Sustainability of Local Food Systems*. Springer (in press).

### 3. Resultats preliminars

#### 3.1. Mètriques del paisatge i biodiversitat

Diversos estudis han demostrat empíricament el valor ecològic d'una matriu territorial heterogènia i connectada, especialment en àrees metropolitanes<sup>65</sup>. Per comprovar que les mètriques del paisatge no son un artefacte metodològic sinó que permeten mesurar els patrons i processos ecològics que sustenten la biodiversitat, s'han posat a prova a diverses escales: regional – $\gamma$  diversitat; emprant dades d'ocells<sup>66</sup>-, de paisatge – $\beta$  diversitat; amb dades d'orquídies<sup>67</sup>-, i local – $\alpha$  diversitat; amb dades de papallones<sup>68</sup>.

A tall d'exemple, es presenten dos casos d'estudi recents a la regió metropolitana de Barcelona. El primer estudi, a escala de paisatge, es va portar a terme en el municipi de Figaró-Montmany (Figura 14), on el procés de transició forestal, la pèrdua de mosaic agro-silvo-pastoral i el desenvolupament urbà entre 1856 i 2005, han afectat la gran diversitat d'orquídies (fins a 38 espècies!) que encara existeixen en aquest indret.

La presència d'orquídies (Figura 14) s'associa positivament als espais oberts (pastures i matollars –l'agricultura actual no contribueix perquè les orquídies son sensibles als pesticides) i negativament a espais forestals i àrees urbanitzades. També mostren resposta positiva als mosaics de cobertes del sòl (*Shannon Index* –heterogeneïtat del paisatge; *Polygon Density* –matriu territorial diversa) i negativa a la fragmentació del territori per àrees urbanitzades (*Effective Mesh Size*), i grans masses forestals (*Large Path Index*).

El segon estudi, a escala local, es va portar a terme a Olzinelles – municipi de Sant Celoni (Figura 15), on l'abandonament rural i la transició forestal afecten les meta-poblacions de papallones (transsecte Can Riera) –sobretot espècies d'espais oberts (pèrdua d'agricultura i ramaderia, i connectivitat entre espais oberts). S'ha volgut recuperar la biodiversitat obrint clarianes al bosc (transsecte Can Valls) però sense èxit degut a la dificultat de recuperar paisatges bio-culturals (apuntem tres motius: espais oberts però no treballats –calen els fluxos metabòlics-; connectivitat per recuperar poblacions; temps transcorregut).

Les mètriques del paisatge permeten mesurar els patrons i processos que sostenen la biodiversitat. En paisatges bio-culturals, els fluxos metabòlics que mou la societat prenen una importància cabdal per mantenir la biodiversitat

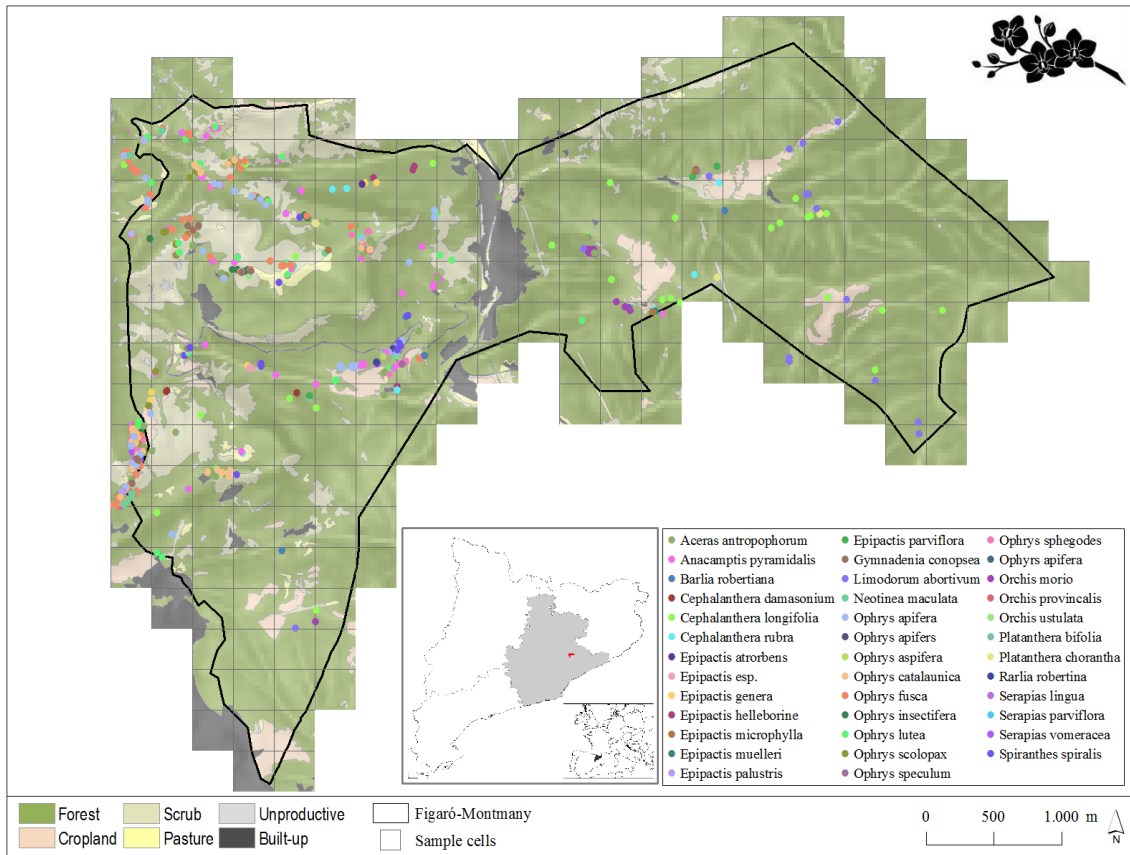
<sup>65</sup> Santos, K.C.; Pino, J.; Rodà, F.; Guirado, M.; Ribas, J. 2008. Beyond the reserves: The role of non-protected rural areas for avifauna conservation in the area of Barcelona (NE of Spain). *Landscape and Urban Planning* 84 (2), 140-151.

<sup>66</sup> Marull, J.; Font, C.; Tello, E.; Fullana, N.; Domene, E.; Pons, M. 2016. Towards an Energy-Landscape Integrated Analysis? Exploring the links between socio-metabolic disturbance and landscape ecology performance (Mallorca, Spain, 1956-2011). *Landscape Ecology* 31, 317-336.

<sup>67</sup> Marull, J.; Tello, E.; Wilcox, P.T. Coll, F.; Pons, M.; Warde, P.; Valldeperas, N.; Ollés, A. 2014. Recovering the landscape history behind a Mediterranean edge environment (The Congost Valley, Catalonia, 1854–2005): The importance of agroforestry systems in biological conservation. *Applied Geography* 54, 1-17.

<sup>68</sup> Marull, J.; Otero, I.; Stefanescu, C.; Tello, E.; Coll, F.; Pons, M.; Diana, G. 2015. Exploring the links between forest transition and landscape changes in the Mediterranean. Can forest recovery lead to lower landscape quality? *Agroforestry Systems* 89 (4), 705-719.

Figura 14 Distribució d'espècies d'orquídies en cel·les UTM 1x1 km<sup>2</sup> en el municipi de Figaró-Montmany. Influència de cobertes del sòl, indicadors del paisatge i topografia.

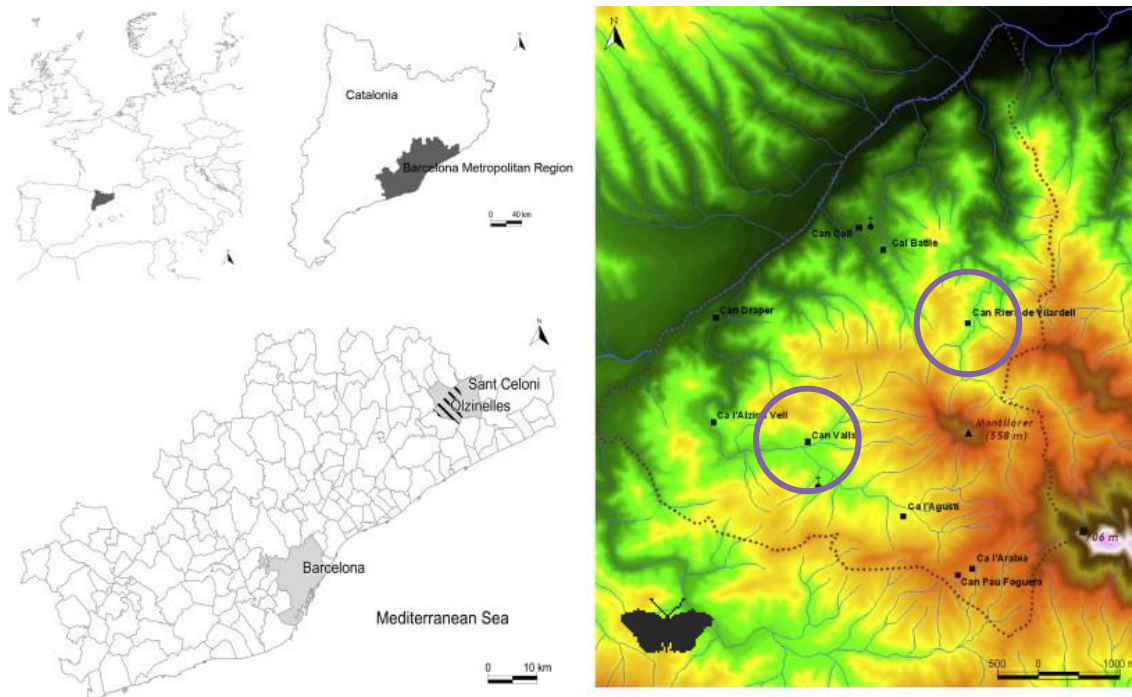


Variables		Presence of Orchids		Total
		No	Yes	
Land cover	Forest (%)	82,90 **	76,35	80,31
	Cropland (%)	2,84	4,76	3,60
	Scrub (%)	7,21	13,95 **	9,88
	Pasture (%)	0,87	2,05 **	1,34
	Unproductive (%)	0,23	0,31	0,26
	Built-up (%)	5,95 *	2,57	4,61
Landscape Metrics	Large Patch Index	78.179,66 **	71.591,56	75.574,37
	Polygon Density	3,51	4,70 **	3,98
	Edge Density	149,62	218,57	176,89
	Effective Mesh Size	0,07 **	0,06	0,07
	Shannon Index	0,39	0,64 **	0,49
	Ecological Connectivity Index	7,29	7,45	7,35
Topography	Rivers (m)	209,97	177,99	197,33
	High (m)	566,95	556,41	562,78
	Aspect (°)	179,79	172,49	176,90
	Slope (°)	21,53	21,31	21,44
N (sample cells)		133	87	220

Note: <sup>1</sup> The results are based on two-tailed tests assuming equal variances with a significance level of 0.05 (\*\*\*) and 0.1(\*). For each significant pair, the key under the category (\*\* or \*) shows up beneath the category with a major average value. Using the Bonferoni adjustment, tests have been adjusted for all pair wise comparisons.

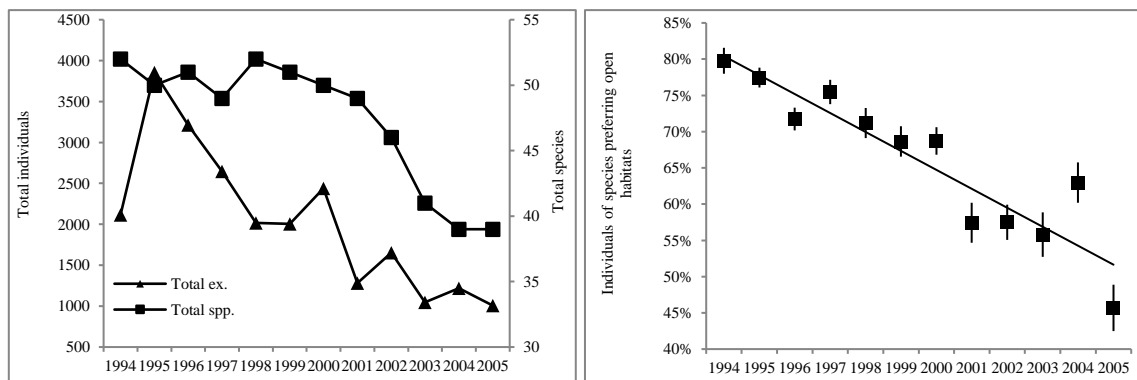


Figura 15 Àmbit d'Olzinelles (municipi de Sant Celoni). Riquesa d'espècies i abundància de papallones en els transectes de Can Riera (1994-2005) i Can Valls (2006-2012).

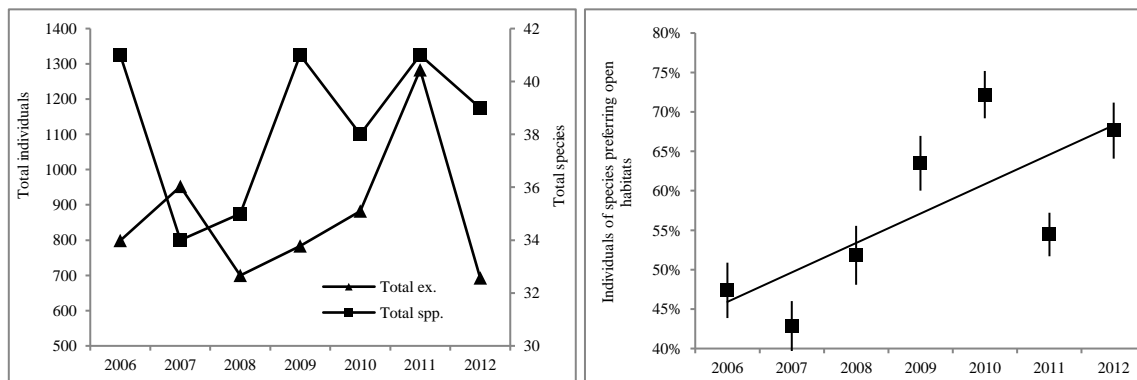


Nota: Localització dels transectes de papallones a Can Riera i Can Valls (cercles)

### Can Riera de Vilardell



### Can Valls d'Olzinelles



### 3.2. Mètriques del paisatge i planejament

Els criteris i mètodes en ecologia del paisatge s'han emprat per elaborar una proposta d'ordenació dels espais oberts per la regió metropolitana de Barcelona (Figura 16). Fet que, al seu torn, ha permès avaluar la relació entre la xarxa ecològica d'espais protegits i la resta de la matriu territorial<sup>69</sup>. Es parteix d'un model de mosaic territorial desenvolupat a escala de directrius estratègiques<sup>70</sup>, que s'apliquen mitjançant el suport de noves metodologies paramètriques elaborades a escala de planejament territorial<sup>71</sup>.

En resulten dos nivells bàsics d'ordenació (Figura 16): xarxa d'espais protegits i matriu d'espais oberts. Es classifiquen segons un ordre jeràrquic de protecció (especial, territorial, preventiva) en sis subnivells: E1) espais protegits; E2) espais connectors principals i de reforç d'àrees protegides; E3) espais connectors secundaris i d'especial interès ecològic; E4) corredors ecològics (espais fluvials d'especial interès connector); E5) espais estructuradors del territori (separació urbana, parcs agraris); E6) espais esmorteïdors de la pressió antròpica (enclavaments verds, paisatge agrícola).

Es comprova la importància d'incorporar nous elements de la matriu (d'E4 a E6) per garantir el funcionament ecològic del territori, considerant el planejament urbanístic i d'infraestructures vigent, respecte a criteris clàssics de protecció d'espais discrets, fins i tot quan aquests estan connectats en xarxa (d'E1 a E3). Es corrobora que cal integrar els assentaments humans en l'estructura funcional del paisatge (Figura 17), repte que requereix un nou model conceptual, eines d'anàlisi, i polítiques públiques apropiades.

Certament, és necessari preservar les serres metropolitanes, àrees "naturals" al mig d'un territori altament antropitzat, amb valors biològics i geològics notables. Però això no justifica l'escassa consideració que s'ha tingut per la matriu d'espais oberts no protegits a les valls, que són els que reben més pressió urbanística i d'infraestructures de tota mena, així com la intensificació agrícola i l'abandonament de les activitats agràries tradicionals.

Una avaluació d'impacte potencial dels plans urbanístics vigents a la regió metropolitana de Barcelona ha permès identificar els sectors urbanitzables especialment problemàtics en relació amb el funcionament ecològic de la matriu territorial, i també les àrees més aptes per establir assentaments urbans, segons la proposta d'ordenació dels espais oberts. Es constata que certa proporció de sectors urbanitzables està en sòls molt poc o gens aptes per a aquest ús. D'altra banda, s'identifiquen sòls aptes, amb planejament sense executar o sense planejament, fins i tot vinculats a la xarxa ferroviària actual o prevista.

Una avaluació ecològica del planejament urbanístic corrobora que és més eficient protegir els espais fluvials i les explotacions agrícoles de les valls que no pas incrementar la xarxa d'espais protegits a les serralades

<sup>69</sup> Pino, J.; Marull, J. 2012. Ecological networks: are they enough for connectivity conservation? A case study in the Barcelona Metropolitan Region (NE Spain). *Land Use Policy* 29, 684–690.

<sup>70</sup> Forman, R.T. 2004. Mosaico territorial para la región de Barcelona. Editorial Gustavo Gili.

<sup>71</sup> Marull, J.; Pino, J.; Mallarach, J.M.; Cordobilla, M.J. 2007. A land suitability index for strategic environmental assessment in metropolitan areas. *Landscape and Urban Planning* 81, 200-212.



Figura 16 Síntesi d'un estudi de base per a l'ordenació dels espais oberts a l'àrea metropolitana de Barcelona, elaborat a partir del model de mosaic territorial.

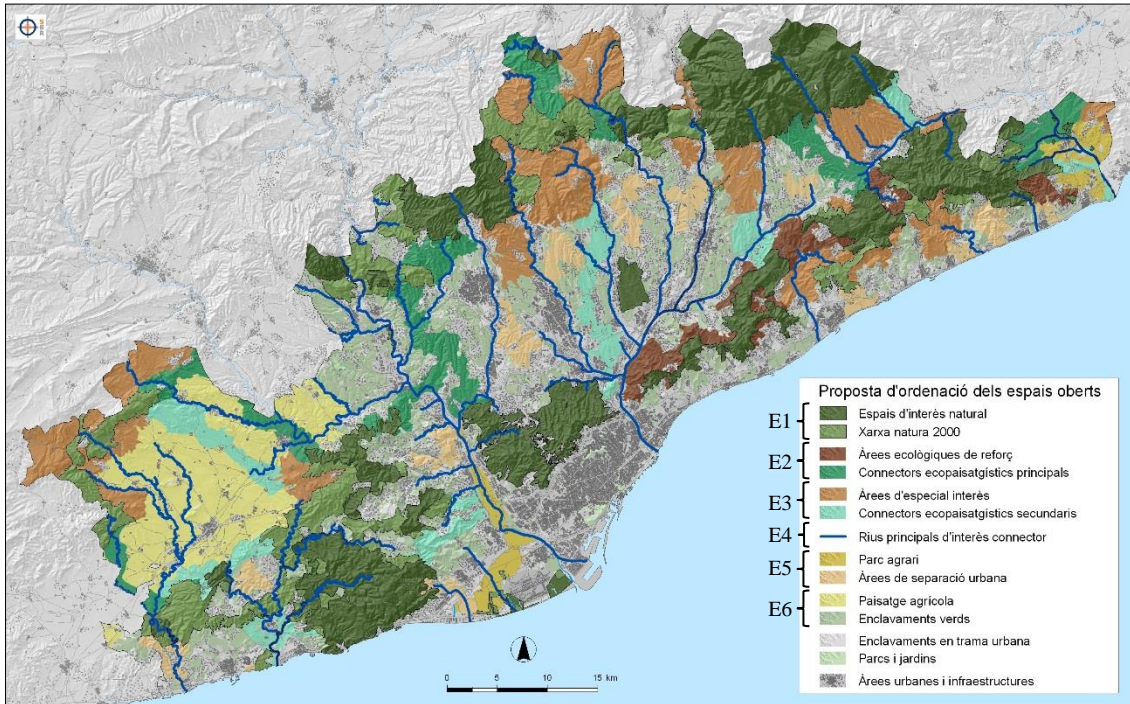
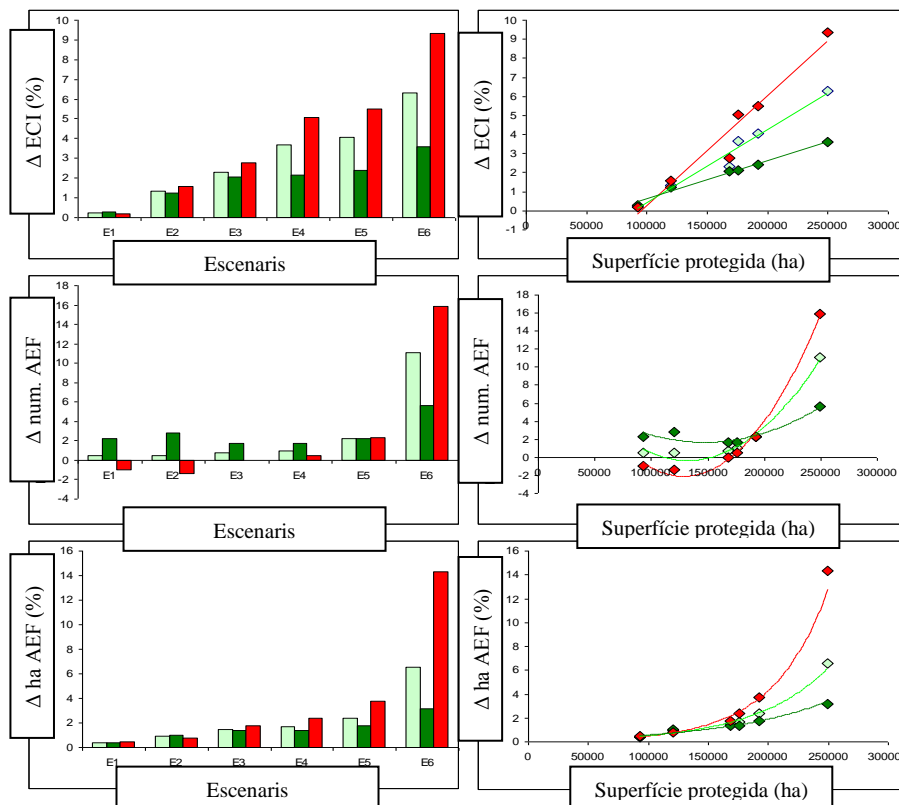


Figura 17 Increments de connectivitat ecològica (a dalt), i nombre (al mig) i superfície total (a baix) d'àrees ecològiques funcionals (AEF), respecte l'escenari tendencial (plans urbanístics) a la regió metropolitana de Barcelona, per diversos escenaris progressius de la proposta d'ordenació dels espais oberts (E1 a E6; Figura 16). Es mostren increments bruts (esquerra) i ponderats per superfície protegida a cada escenari (dreta). Els càlculs es presenten per AEF totals (vermell), forestals (verd fosc) i agrícoles (verd clar).



### 3.3. Model energia-territori a Catalunya

L'objectiu principal d'aquest estudi és posar a prova la relació entre metabolisme social i biodiversitat a través de gradients de transformació del paisatge a escala regional<sup>72</sup>.

Per avaluar si el model de Pertorbació Intermèdia – Complexitat (IDC; *Intermediate Disturbance – Complexity*) és un bon predictor de la biodiversitat en paisatges culturals com els de la Mediterrània, hem tingut en compte les següents variables (Figura 18 i Figura 19): components (cobertes del sòl) i configuració del paisatge (H' –heterogeneïtat, ECI –connectivitat; ambdós indicadors conformen Le –*Landscape Ecological Metric*), pertorbació antròpica (HANPP –*Human Appropriation of Net Primary production*), IDC (constituït per Le i HANPP) i riquesa d'espècies total i per taxons (plantes vasculars, amfibis, rèptils, ocells i mamífers) per unitats d'anàlisi UTM 10-km a Catalunya (2009).

Una *Negative Binomial Regression* –NBR (Figura 20) mostra la relació estadística (factor 1 a les gràfiques) que hi ha entre biodiversitat total i dues variables: IDC i coberta forestal. Aquesta relació es compleix per tots els taxons estudiats excepte pels ocells. En conseqüència, tant els espais naturals (*land-sparing*) com els paisatges culturals (*land-sharing*) son importants per la conservació de la biodiversitat.

Una *Exploratory Factor Analysis* –EFA (Figura 21) permet visualitzar la relació entre biodiversitat i les variables IDC, Le, HANPP i cobertes del sòl. La biodiversitat total vindria explicada tant per IDC com les cobertes forestals, amb diferents matisos segons els taxons. Per exemple, les plantes vasculars estan més condicionades per IDC, mentre que els mamífers pels espais naturals. Els ocells novament surten d'aquesta tendència.

Un *Structural Equation Model* –SEM (Figura 22) avalua la contribució relativa a la biodiversitat total de les variables Le i HANPP (components de IDC), les cobertes del sòl (un *Principal Component Analysis* –PCA selecciona: Cm1 associat positivament a cobertes forestals i negativament a cobertes agrícoles, i Cm2 associat a altres cobertes) i les elevacions del terreny (DEM; *Digital Elevation Model*, com a variable control).

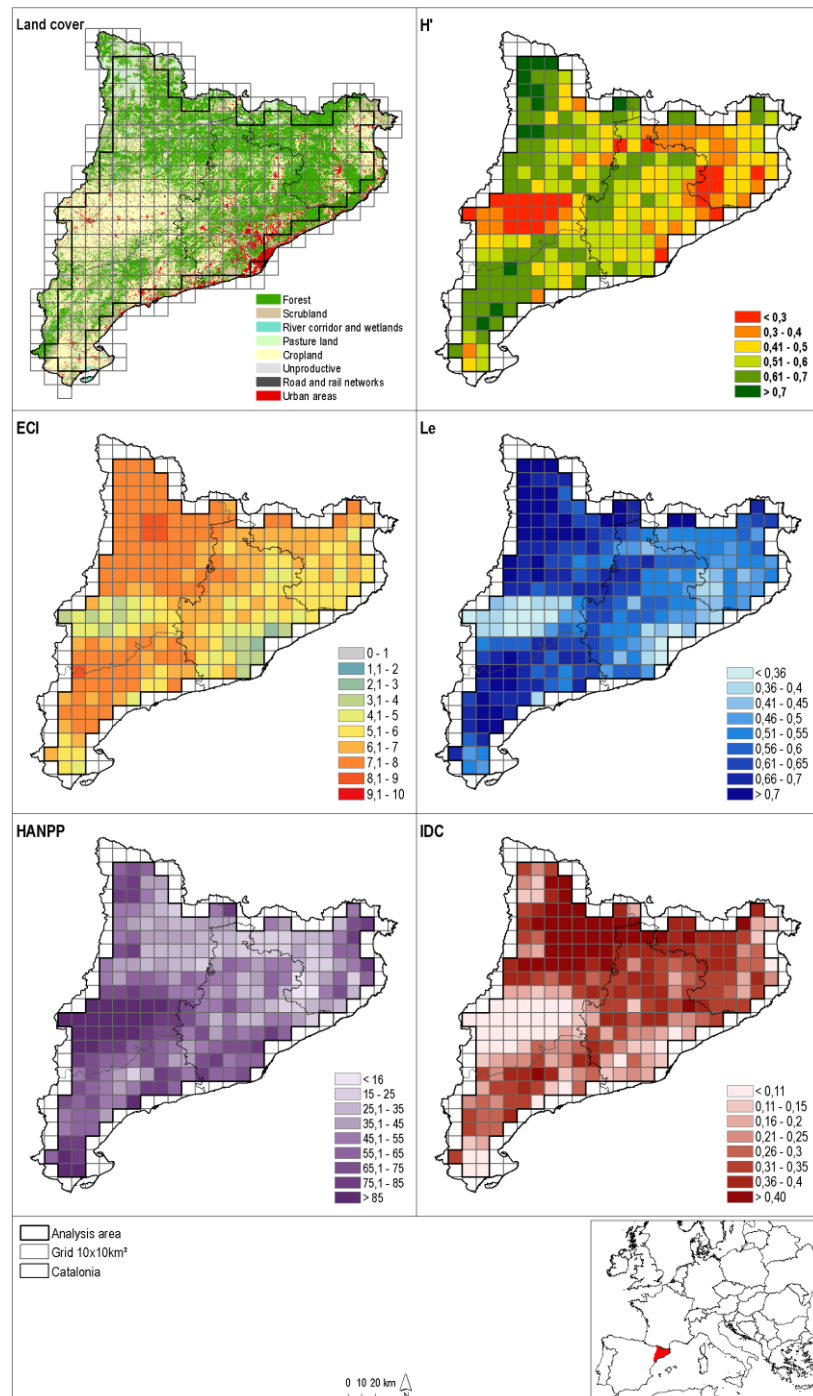
Els resultats SEM confirmen la contribució dels espais naturals (Cm1; coeficient 2.08) però també de l'explotació agrícola (HANPP; coeficient 1.82) en la preservació de la biodiversitat total, així com una relació negativa entre Cm1 i HANPP (coeficient -0.95). Aquest “triangle virtuos” entre espais naturals, explotació agrícola i biodiversitat explica la subtil relació home-natura característica dels paisatges culturals, i l'aportació sinèrgica de les aproximacions *land-sharing-land-sparing* en la conservació de la biodiversitat.

Els paisatges bio-culturals (*land-sharing*) contribueixen a la biodiversitat, de forma sinèrgica amb els espais naturals (*land-sparing*). Una agricultura més ecològica milloraria la qualitat ecològica del territori

---

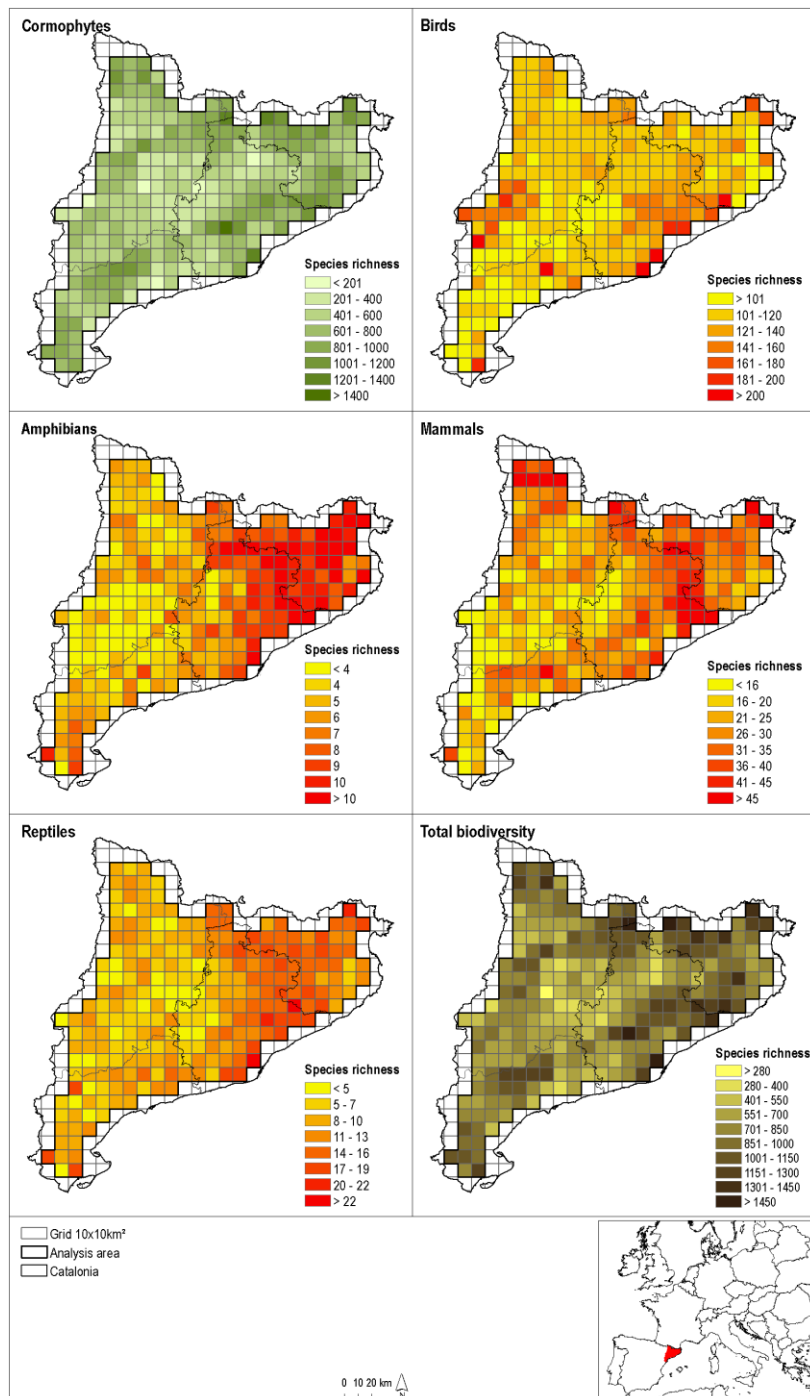
<sup>72</sup> Marull, J.; Tello, E.; Bagaria, G., Font, X.; Cattaneo, C.; Pino, J. 2018. Exploring the links between social metabolism and biodiversity distribution across landscape gradients: A regional-scale contribution to the land-sharing versus land sparing debate. *Science of the Total Environment* (online), 1272-1285.

Figura 18 Cobertes del sòl i mètriques del paisatge ( $H'$ , ECI, Le, HANPP, IDC) per unitats d'anàlisi UTM 10 km a Catalunya (dades de 2009)



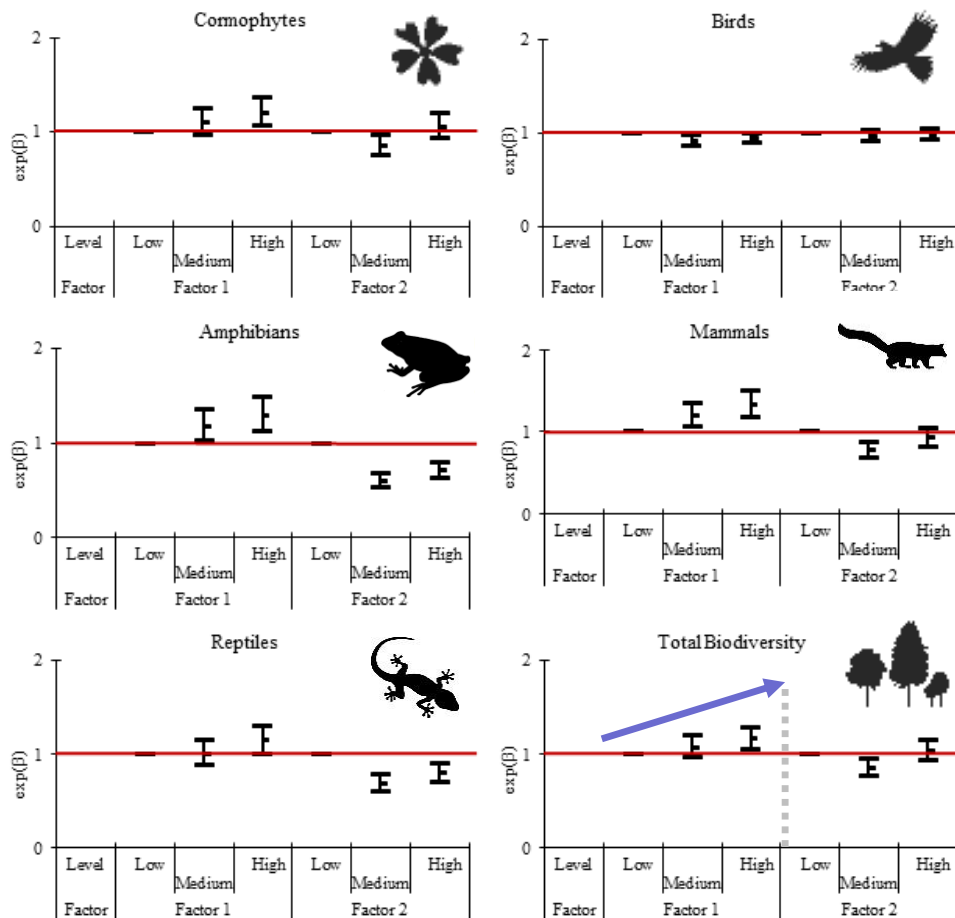
Note: Shannon-Wiener Index ( $H'$ ), Ecological Connectivity Index (ECI), Landscape Ecology metric (Le), Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP), Intermediate Disturbance Complexity (IDC).

Figura 19 Riquesa d'espècies total i per diferents taxons (plantes vasculares, amfibis, rèptils, ocells i mamífers) per unitats d'anàlisi UTM 10 km a Catalunya (dades de 2009)



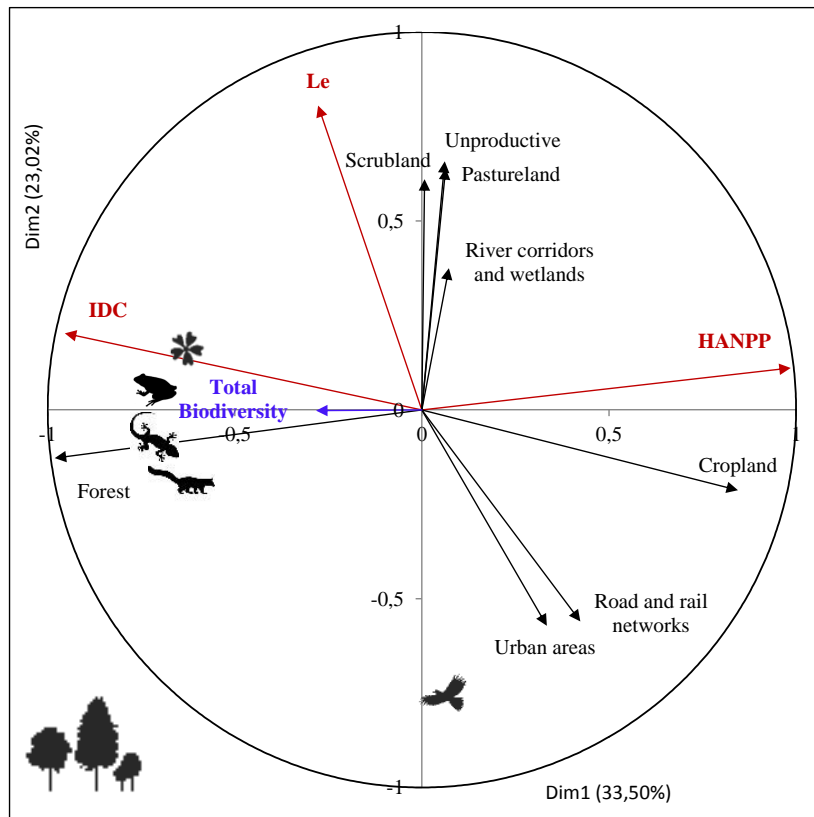
Font: Banc de Dades de Biodiversitat de Catalunya (BDBC)

Figura 20 Negative Binomial Regression Analysis per les variables: plantes vasculars, amfibis, rèptils, ocells, mamífers i biodiversitat total; considerant el model IDC i les cobertes del sol de Catalunya (cel·les UTM 10 km).



Note: Factor 1 =  $0.318 \cdot \text{IDC} + 0.304 \cdot \text{Forest} - 0.256 \cdot \text{Cropland} + 0.038 \cdot \text{Scrubland} - 0.028 \cdot \text{Pastureland} - 0.027 \cdot \text{River corridor and wetlands} - 0.027 \cdot \text{Unproductive} - 0.188 \cdot \text{Road and rail networks} - 0.162 \cdot \text{Urban areas}$  (Dim 1: 34.78%); Factor 2 =  $-0.077 \cdot \text{IDC} - 0.164 \cdot \text{Forest} - 0.042 \cdot \text{Cropland} + 0.147 \cdot \text{Scrubland} + 0.407 \cdot \text{Pastureland} + 0.256 \cdot \text{River corridor and wetlands} + 0.426 \cdot \text{Unproductive} - 0.114 \cdot \text{Road and rail networks} - 0.104 \cdot \text{Urban areas}$  (Dim 2: 22.88%).

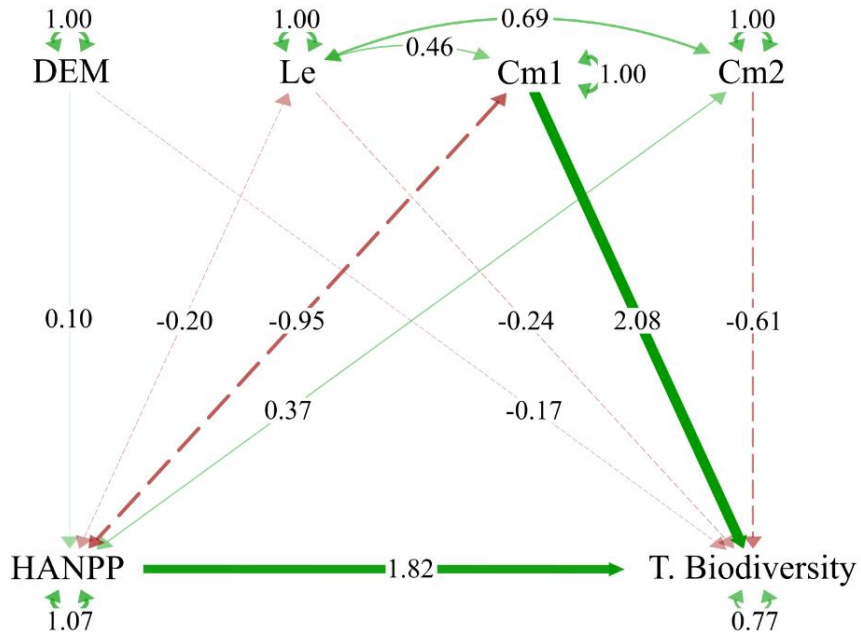
Figura 21 Exploratory Factor Analysis per les variables: biodiversitat total i cobertes del sol de Catalunya (cel·les UTM 10 km; 2009).



Note: Landscape Ecology metric (Le), Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP), Intermediate Disturbance Complexity (IDC).



Figura 22 *Structural Equation Model* per explorar els efectes de l'agricultura en la biodiversitat total a Catalunya (cel·les UTM 10 km; 2009), considerant les variables: HANPP, cobertes del sol (Cm), mètriques del paisatge (Cn), i un model digital d'elevacions com a control (MDE).



Note: *Landscape Ecology metric (Le)*, *Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP)* and *Intermediate Disturbance Complexity (IDC)*. Cm1 = +0.649\*Forest -0.674\*Cropland + 0.180\*Grassland/scrubland -0.301\*Urban/roads (Dim 1: 33.6%); Cm2 = -0.395\*Forest +0.027\*Cropland + 0.816\*Grassland/scrubland -0.422 \*Urban/roads (Dim 2: 24.4%).

### 3.4. Model energia-territori a la província de Barcelona

L'objectiu principal d'aquest l'estudi és avaluar com els canvis en el metabolisme social i les cobertes del sòl han modificat l'estructura funcional del paisatge i la biodiversitat a la província de Barcelona (1956 i 2009).

Per avaluar si els canvis en pertorbació antròpica i l'ecologia del paisatge afecten la biodiversitat, en primer lloc hem analitzat les dinàmiques en les cobertes del sòl des de 1956 fins 2009 –darreres dades disponibles- a la província de Barcelona (Figura 23).

La matriu de canvi (Taula 2) mostra un gran creixement de les àrees urbanes (53.900,8 ha; 519,8%), un considerable augment del bosc (233.357,3; 119,3%) i un molt notable decreixement de l'agricultura (104.359,8; 60,3%). Aquests canvis en les cobertes del sòl han afectat l'estructura funcional del paisatge (Figura 23).

Les mètriques de patrons del paisatge (Taula 3) mostren variacions en el període d'anàlisi, destacant un decreixement estadísticament significatiu en l'heterogeneïtat de cobertes ( $H'$ ; *Shannon-Wiener Index*). En quant a les mètriques de processos del paisatge, destaca el decreixement també estadísticament significatiu de la connectivitat ecològica (ECI; *Ecological Connectivity Index*): Això fa que l'índex Le (*Landscape Ecology Metric*, compostat per  $H'$  i ECI) també decreixi entre 1956 i 2009.

Les mètriques de metabolisme social (Taula 3) també mostren variacions, destacant el decreixement de HANPP (*Human Appropriation of Net Primary Production*), degut a la pèrdua de superfície agrícola, com ja s'ha comentat anteriorment.

Una *Negative Binomial Regression* –NBR (Taula 4) mostra com afecten a la biodiversitat total (inclou plantes vasculares, amfibis, rèptils, ocells i mamífers) els canvis en el metabolisme social i les mètriques del paisatge durant el període 1956-2009, en unitats d'anàlisi UTM 10-km a la província de Barcelona.

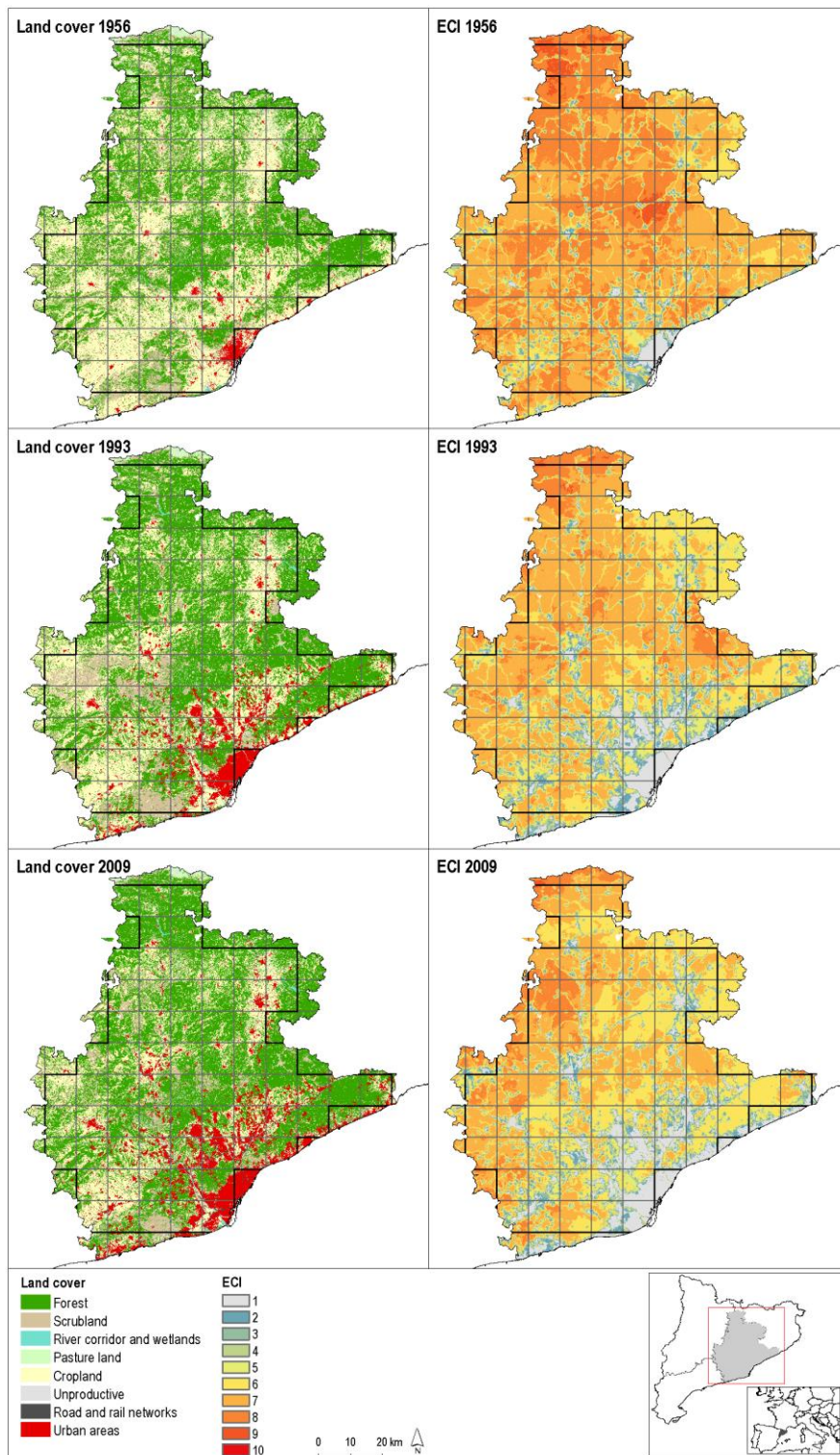
Resulta interessant comprovar com HANPP afecta positivament la riquesa d'espècies (o el que és el mateix: un descens de l'activitat agrícola disminueix la biodiversitat). D'altra banda, grans masses forestals (LPI; *Largest Path Index*) també afecten positivament la biodiversitat (Taula 4). L'heterogeneïtat del paisatge ( $H'$ ) presenta un efecte negatiu, molt probablement degut a la fragmentació del territori per àrees urbanes i infraestructures (com reflecteix EMS –*Effective Mesh Size*, Taula 3).

Aquests resultats reforcen els obtinguts anteriorment (apartat 3.3), en el sentit de que tant la pèrdua de superfície agrícola (HANPP) com de grans masses forestals (LPI) –en ambdós casos afectades pel creixement urbanístic i la fragmentació del territori- suposen una pèrdua de biodiversitat. No obstant, degut a les dinàmiques de les cobertes del sòl, el manteniment de la biodiversitat sembla estretament associat a l'activitat agrícola i l'ús integrat del territori, de forma que el planejament territorial i urbanístic és fonamental.

Canvis històrics (1956-2009) en el metabolisme social i l'estructura del paisatge es relacionen amb la biodiversitat actual. La pèrdua d'activitat agrícola i la fragmentació del territori han de ser corregits pel planejament



Figura 23 Canvi en les cobertes del sol i la funcionalitat ecològica del territori (ECI; *Ecological Connectivity Index*) a la província de Barcelona (1956-1993-2009). Es representen les cel·les de 10x10 km<sup>2</sup> emprades en les anàlisis estadístiques.



**Taula 2** Canvi en les cobertes del sol a la província de Barcelona (1956-1993-2009).

Land covers	1956		1993			2009		
	ha	%	ha	%	1956=100%	ha	%	1956=100%
Forest	195,526.4	40.7	223,060.6	46.5	114.1	233,357.3	48,6	119.3
Scrubland	77,540.6	16.2	66,970.1	14.0	86.4	54,040.4	11,3	69.7
River and wetlands	1,759.7	0.4	1,755.3	0.4	99.7	2,097.0	0,4	119.2
Pasture land	11,170.3	2,3	2,780.9	0.6	24.9	14,651.1	3,1	131.2
Cropland	173,140.0	36.1	135,288.2	28.2	78.1	104,359.8	21,7	60.3
Unproductive	8,246.7	1.7	10,688.9	2.2	129.6	10,106.3	2,1	122.5
Networks	2,246.6	0.5	3,509.4	0.7	156.2	7,487.2	1,6	333.3
Urban area	10,369.7	2,2	35,946.7	7.5	346.7	53,900.8	11,2	519.8
Total	480,000.0	100.0	480,000.2	100.0		480,000.0	100.0	

**Taula 3** Canvi en les mètriques del paisatge aplicades a la província de Barcelona (cel·les 10x10 km<sup>2</sup> ; 1956, 1993, 2009).

Landscape ecology metric	1956 (A)	1993 (B)	2009 (C)
<i>Polygon Density</i> –PD (n°)	3,081.19 B	2,122.48 -	3,786.98 AB
<i>Edge Density</i> –ED (km)	31.51 B	24.79 -	31.58 B
<i>Shannon-Wiener Index</i> (H')	0.589 BC	0.499 -	0.504 -
<i>Largest Patch Index</i> –LPI (km <sup>2</sup> )	1,964.82 -	2,941.03 AC	2,096.68 -
<i>Effective Mesh Size</i> –EMS (km <sup>2</sup> )	256.49 BC	118.97 -	121.51 -
<i>Ecological Connectivity Index</i> –ECI	6.81 BC	5.65 -	5.23 -
<i>Landscape Ecology Metric</i> –Le	0.635 BC	0.532 -	0.514 -
<i>Net Primary Production actual</i> –NPPact (TnC year_1 ha_1)	69.08 -	92.69 A	86.04 A
<i>Net Primary Production harvested</i> –NPPharv (TnC year_1 ha_1)	24.97 -	35.82 AC	25.73 -
<i>Human Appropriation of NPP</i> –HANPP (%)	60.87 BC	48.78 -	50.42 -

Note: The results are based on two-tailed tests assuming equal variances with a significance level of 0.05. For each significant pair, the key under the category (A, B, C) shows up beneath the category with a mayor average value. Using the Bonferroni adjustment, tests have been adjusted for all pair wise comparisons.

**Taula 4** *Negative Binomial Regression Analysis* per la variable biodiversitat total, considerant l'increment ( $\Delta$ ) de HANPP i de les mètriques del paisatge (H', LPI, ED, EMS, PD, ECI) a la província de Barcelona (cel·les UTM 10 km); en el període 1956–2009.

Total biodiversity	IRR	Std. Err.	z	P >  z
$\Delta$ HANPP	1.131.708	0.0635875	2.20	0.028 (**)
$\Delta$ H'	0.8021502	0.0474604	-3.73	0.000 (*)
$\Delta$ LPI	1.127.465	0.0552422	2.45	0.014 (**)
$\Delta$ PD	1.197.155	0.1307309	1.65	0.099
$\Delta$ ED	0.9956796	0.1506597	-0.03	0.977
$\Delta$ EMS	1.058.495	0.0377234	1.60	0.111
$\Delta$ ECI	0.9900188	0.0454647	-0.22	0.827
cons.	813.2975	27.23647	200.10	0.000

Likelihood-ratio test of alpha=0:  $\text{chibar2}(01) = 3902.05$  Prob>=chibar2 = 0.000

### 3.5. Model energia-territori al Vallès

S'ha aplicat el model ELIA en cinc municipis del Vallès (Figura 24) per explorar la diferència entre una economia de base orgànica (1860) i una economia basada en els combustibles fòssils (2000)<sup>73</sup>. Els gràfics amb els cicles metabòlics dels dos sistemes agrícoles es relacionen perfectament amb la matriu territorial on es donen (mosaics del paisatge el 1860; i creixement urbà, ramaderia intensiva i transició forestal el 2000).

L'herència cultural de paisatges en mosaic (no de grans masses forestals) i alta eficiència energètica (no dependència d'inputs externs –economia circular) ha permès mantenir la funcionalitat de la matriu territorial

El model ELIA analitza la interrelació entre energia i informació, i com aquests fluxos són impresos en l'estructura funcional del paisatge. La Figura 25 mostra els valors teòrics possibles (a dalt) i els resultats empírics (a baix) de la relació energia-informació-paisatge, en un cas d'estudi a la regió metropolitana de Barcelona (la plana del Vallès).

Es tracta d'un model tridimensional representat en dues dimensions mitjançant l'energia –E i la informació –I (mostrant la tercera variable relativa a l'estructura del paisatge –L mitjançant una gama de colors, on els valors més alts es superposen als més baixos). Els principals resultats de l'aplicació del model ELIA al Vallès son:

- Una agricultura de base orgànica (1860) era poc dissipativa (amb una gran quantitat d'energia reutilitzada dins la matriu territorial, i redistribuïda en base a una alta informació, en un paisatge extremadament eficient).
- Una agricultura basada en els combustibles fòssils (2000) està molt més polaritzada: amb transició forestal a un extrem –poc dissipativa; ramaderia industrial en l'altre extrem –molt dissipativa; i manteniment d'alguns paisatges en mosaic basats en l'agricultura tradicional –més equilibrats.

En síntesi, el model ELIA permet mostrar: la importància de la proporció d'energia reutilitzada dins del sistema, com aquesta energia és redistribuïda internament pel coneixement de l'agricultor; i com l'energia reutilitzada i redistribuïda s'imprimeix en l'estructura funcional del paisatge.

A nivell històric es perd resiliència del paisatge en favor de l'entropia (urbanització, intensificació agrícola), malbaratant l'eficiència territorial (abans la societat no només vivia *en* sinó també *del* territori)

Cal, per tant, comprendre el funcionament dels nostres paisatges culturals, projectant a partir de la història un nou planejament del territori entès com a sistema socioecològic. Es tracta d'un nou paradigma que utilitza noves eines i coneixements per gestionar l'eficiència territorial (apartat 1.7), entesa com la qualitat que permet el benestar socioeconòmic de la gent que hi viu, tot garantint la qualitat ecològica dels seus paisatges.

---

<sup>73</sup> Marull, J.; Font, C.; Padró, R.; Tello, E.; Panazzolo, A. 2016. Energy–Landscape Integrated Analysis: A proposal for measuring complexity in internal agro-ecosystem processes (Barcelona Metropolitan Area, 1860-2000). *Ecological Indicators* 66, 30-46.

Figura 24 Aplicació del graf de cicles metabòlics en un cas d'estudi al Vallès, en dos temps: agricultura orgànica –1860; i agricultura industrial –2000. El gruix de les fletxes correspon al flux d'energia (GJ/ha). Es mostra la relació amb les cobertes del sòl (mosaics del paisatge –1860; creixement urbà, ramaderia intensiva i transició forestal –2000).

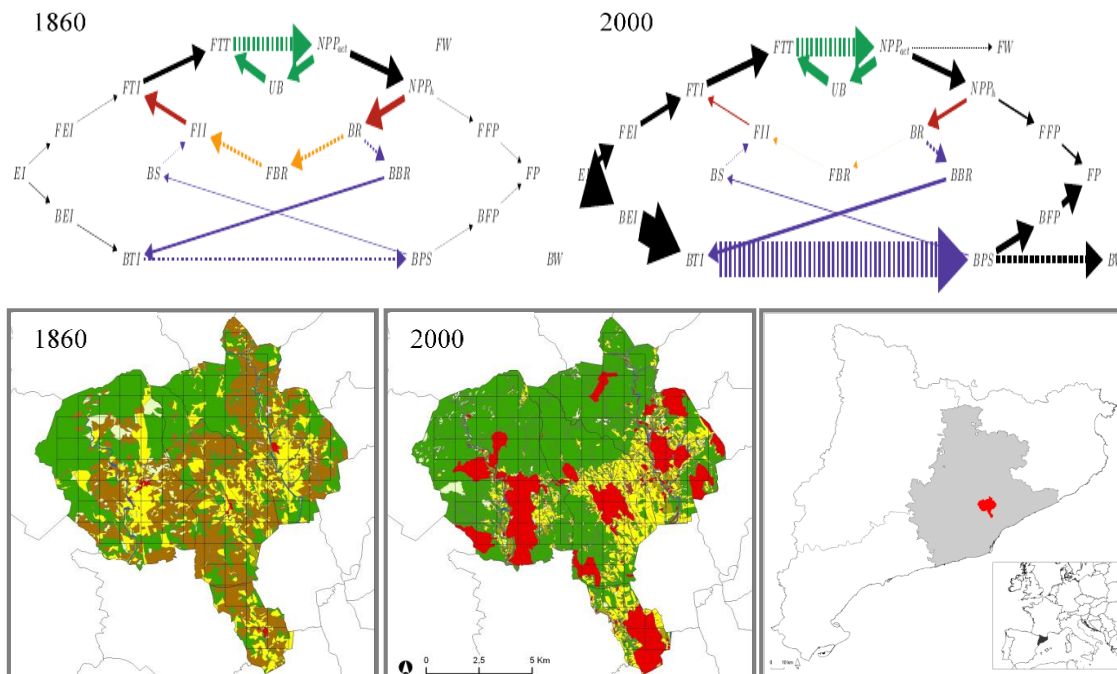
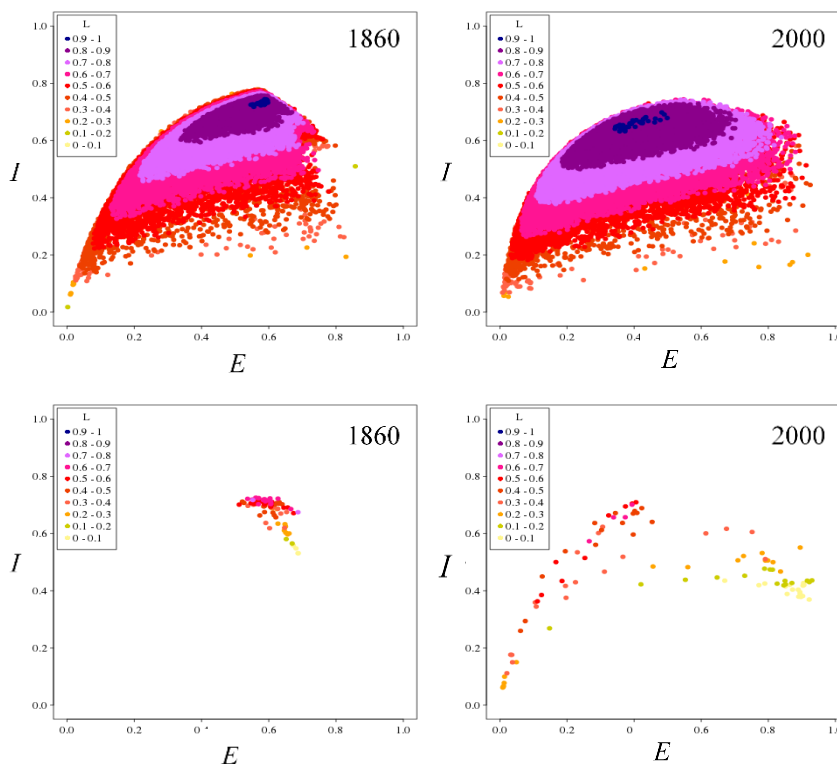


Figura 25 Esquema teòric (a dalt) de la relació entre l'energia reinvertida ( $E$ ; *Energy Storage*), l'energia redistribuïda ( $I$ ; *Energy Information*) i l'energia impresa en el paisatge ( $L$ ; *Landscape Complexity*), i aplicació (a baix) al cas d'estudi del Vallès (1860 i 2000).



## 4. Aplicació a la metròpoli

### 4.1. Plantejament del treball

Adoptem el marc teòric de la anàlisi del metabolisme social, en particular la anàlisi multi-EROI desenvolupada en el projecte SFS<sup>74</sup> (apartat 4.2), segons la qual es comparen els fluxos energètics de sortida amb els d'entrada per diferents categories (veure un resum a l'apartat 2.2). Es relacionen els fluxos dels productes finals (total, derivats de la terra o de la cabanya ramadera) o de productivitat primària, amb els fluxos dels inputs (totals, interns, externs, i energia no collida).

Atesa la complexitat dels agro-ecosistemes, formats per diverses tipologies de bens fons, s'aplica una anàlisi integrada i multi-escalar sobre la relació flux-fons del metabolisme social<sup>75</sup> (apartat 4.3). Els fons són la terra i les seves subcategories (conreus, pastos, boscos, matollars), la cabanya ramadera i les seves subcategories (animals de tir, ruminants, mono-gàstrics), la força motriu (potència instal·lada de maquinaria), o les persones (habitants, força treball de l'agricultura). Es considera la relació entre diferents fons o entre fons i fluxos energètics, en la seva evolució temporal (1956-2009) o entre municipis (de l'AMB i l'RMB).

En síntesi, s'entén la anàlisi integrada multi-escalar com la combinació dels diferents components dels agro-ecosistemes (terra, cabanya ramadera, maquinaria, força de treball) que fan diverses funcions (per exemple, la terra dona productes finals i alimenta la cabanya ramadera, que al seu torn dona productes finals, força motriu per conrear la terra, fems per la seva fertilització, mentre la maquinaria facilita el treball humà, etc.) a diferents nivells espacio-temporals.

Finalment, s'aplica ELIA (*Energy – Landscape Integrated Analysis*)<sup>76</sup>, el que permet la “territorialització” dels fluxos energètics en la matriu territorial (apartat 4.4), amb la identificació d'indicadors de l'ecologia del paisatge i l'estudi de la seva relació amb el metabolisme social. Es tracta d'un innovador cas d'explicitació espacial del metabolisme social. Els resultats de la anàlisi integrada energia-territori, segons una aproximació multi-escalar, permeten treure conclusions sobre la sostenibilitat de l'agricultura metropolitana, així com identificar elements clau per la seva gestió i planejament.

Es presenta l'aplicació de tres anàlisis del metabolisme social (anàlisi multi-EROI, anàlisi multi-escalar, anàlisi energia-territori –ELIA) a nivell local (municipis) i regional (AMB, RMB), en el període 1956-2009

<sup>74</sup> Tello, E.; Galán, E.; Sacristán, V.; Cunfer, G., Guzmán, G.I.; González de Molina, M.; Krausmann, F.; Gingrich, S.; Padró, R.; Marco, I.; Moreno-Delgado, D. 2016. Opening the black box of energy throughputs in agroecosystems: a decomposition analysis of final EROI into its internal and external returns (the Vallès County Catalonia, c.1860 and 1999). *Ecological Economics* 121, 160-174.

<sup>75</sup> Giampietro, M.; Mayumi, K.; Sorman, A.H. 2013. *Energy Analysis for Sustainable Future: Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism*. Routledge.

<sup>76</sup> Marull, J.; Font, C.; Padró, R.; Tello, E.; Panazzolo, A. 2016. Energy–Landscape Integrated Analysis: A proposal for measuring complexity in internal agro-ecosystem processes (Barcelona Metropolitan Area, 1860-2000). *Ecological Indicators* 66, 30-46.



## 4.2. Anàlisi multi-EROI

La anàlisi multi-EROI relaciona els fluxos d'energia dels agro-ecosistemes segons tres tipologies: d'entrada, de recirculació, i de sortida (apartat 2.2). A continuació es presenten els resultats de l'aplicació del EROIs econòmics i agroecològics –1956-2009 (Taula 5).

Per fluxos d'entrada es consideren treball humà, residus domèstics i fems humans, així com inputs que provenen de la societat, tant d'origen renovable (llavors, pinsos, animals) com no renovables (energia per la producció i manteniment de la maquinaria, fertilitzants sintètics, biocides, electricitat per al bombeig d'aigua). Per fluxos de recirculació es consideren la biomassa no recollida, la biomassa que re-circula de la terra cap a la ramaderia, i la biomassa que re-circula de la terra cap al camp, així com la biomassa que circula de la cabanya cap al camp –en forma de fems i treball animal. Per fluxos de sortida es consideren els productes finals (ramaderia, agricultura, forestals).

### 4.2.1. EROIs econòmics:

En general, *Final EROI* (FEROI; retorn a la societat de l'energia invertida) baixa entre 1956 i 2009 (Figura 26), degut a la industrialització de l'agricultura, que requereix més inputs externs, tal com evidencia *External Final EROI* (EFEROI; relació entre inputs externs i producció final) (Figura 27). L'evolució de *Internal Final EROI* (IFEROI; eficiència en que la biomassa reciclada es transforma en producte final) puja en gairebé tots el casos (Figura 28), perquè ara hi ha un menor esforç en recirculació de biomassa que en el passat, i confirma la hipòtesis de que la industrialització de l'agricultura ha suposat la substitució de la biomassa reciclada per més inputs externs. L'agricultura s'ha tornat una activitat més lineal (semblant a un procés industrial input-output) quan abans estava basada en la complexitat metabòlic-territorial (recirculació interna de biomassa).

### 4.2.2. EROIs agroecològics:

En la majoria de municipis, *Net Primary Production EROI* (NPPEROI; capacitat productiva de l'agro-ecosistema) va baixar entre 1956 i 2009 (Figura 29). Pel que fa *Agroecological Final EROI* (AFEROI; energia necessària per obtenir biomassa per la societat) mostra una tendència similar a FEROI (Figura 30). Finalment, *Biodiversity EROI* (energia disponible per les cadenes tròfiques) ha tingut una tendència positiva a l'AMB –tot i que resulta negativa a l'RMB (Figura 31).

FEROI es divideix en components vegetal i animal (evolució similar a FEROI). Però el component animal es un ordre de magnitud inferior al vegetal (fotosíntesis). Això implica que a major proporció ramadera al producte final, més ineficient és l'agricultura. Això en part explica perquè FEROI puja a Barcelona ja que, amb el desplaçament de la producció de llet i el tancament de vaqueries, disminueix el producte d'origen animal (s'importa). Amb l'excepció de Castellbisbal i Montcada, la component animal baixa a l'AMB d'un 15% a només un 3%, mentre que a l'RMB puja de 8% a 20% (Figura 32).

En el període d'anàlisi (1956-2009) hi ha una pèrdua d'eficiència –retorn d'energia a la societat (EROIs econòmics), i de la capacitat productiva – energia disponible per les cadenes tròfiques (EROIs agroecològics).



Figura 26 Aplicació de *Final EROI* –FEROI (producte final –FP / inputs totals consumits –TIC) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009.

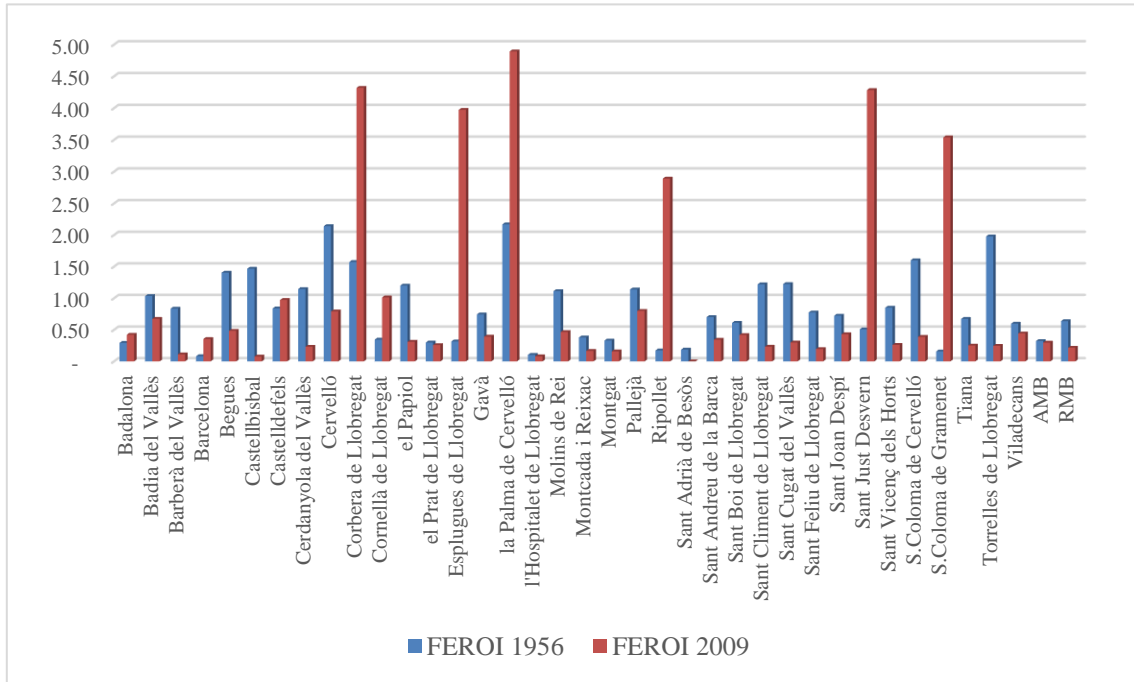


Figura 27 Aplicació de *External Final EROI* –EEROI (producte final –FP / inputs externs –EI) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009.

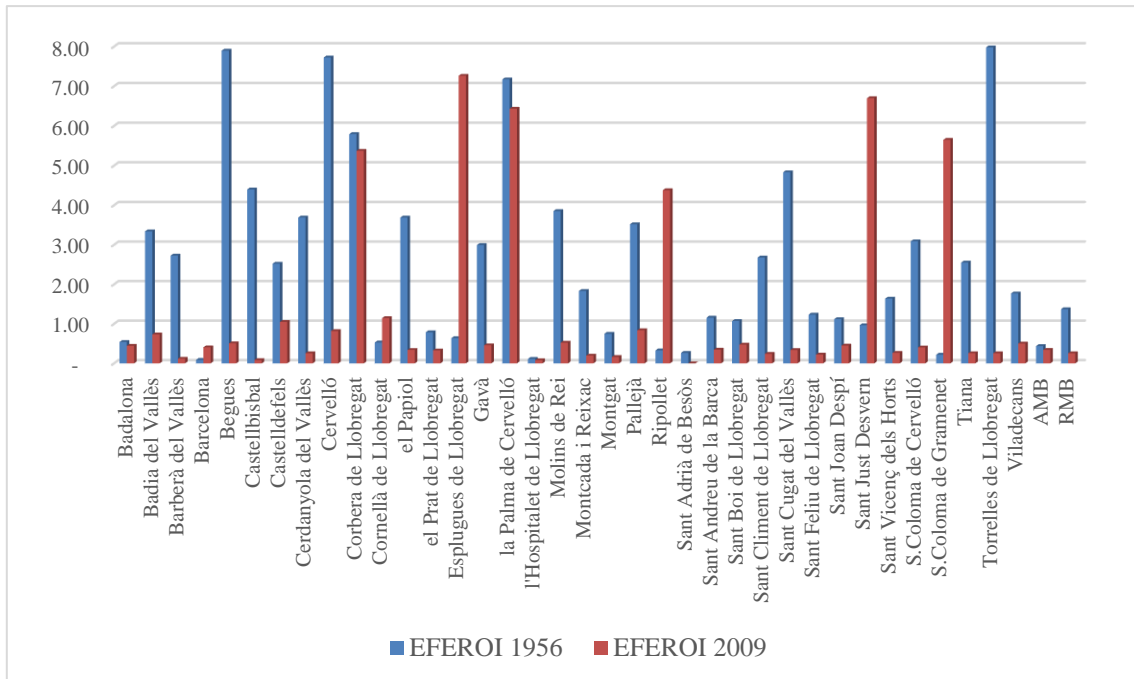


Figura 28 Aplicació de *Internal Final EROI* –IEROI (producte final –FP / biomassa reutilitzada –BR) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009.

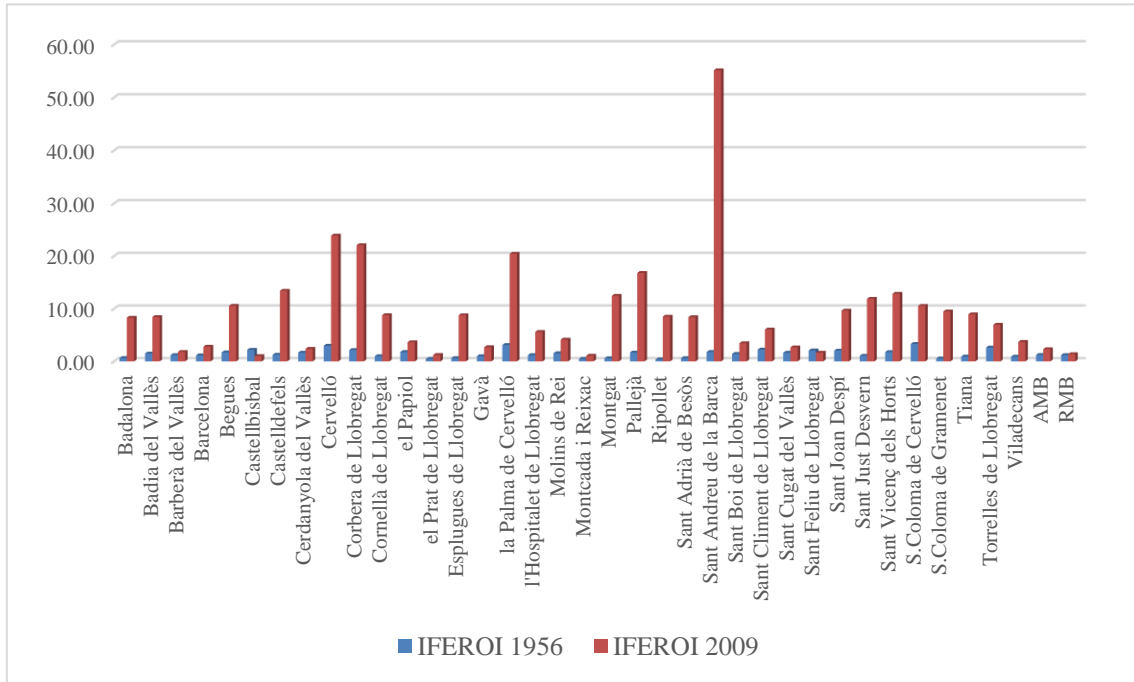
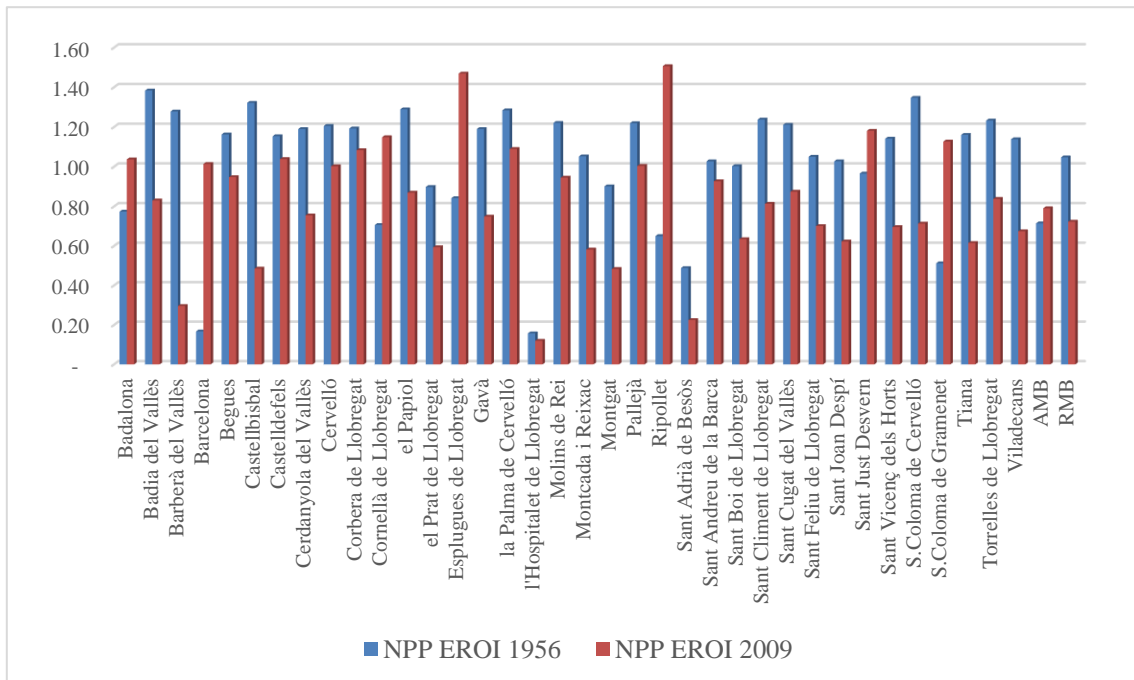
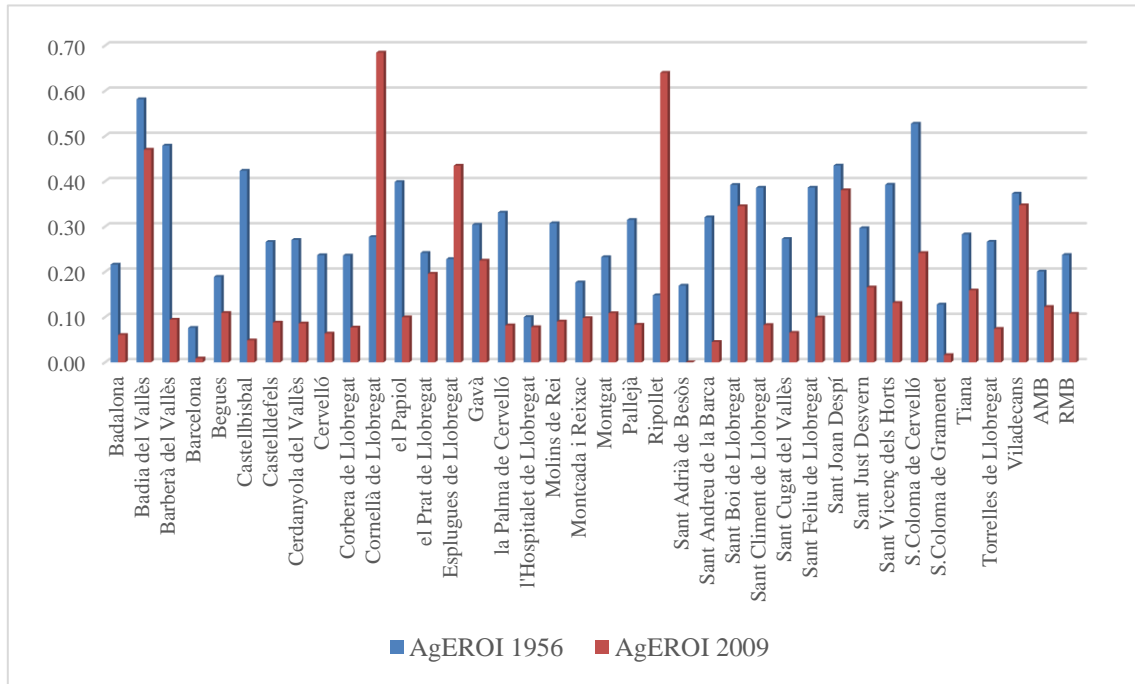


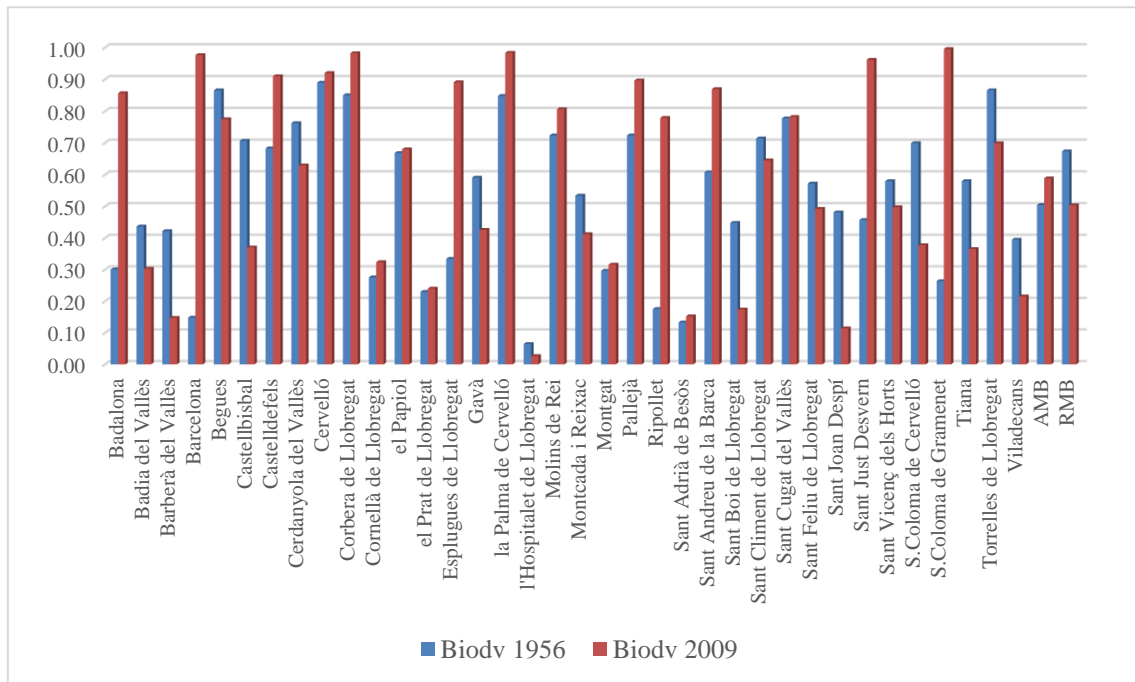
Figura 29 Aplicació de *Net Primary Production EROI* –NPPEROI (producció primària neta actual –NPPact / inputs totals consumits –TIC + biomassa no collida –UB) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009.



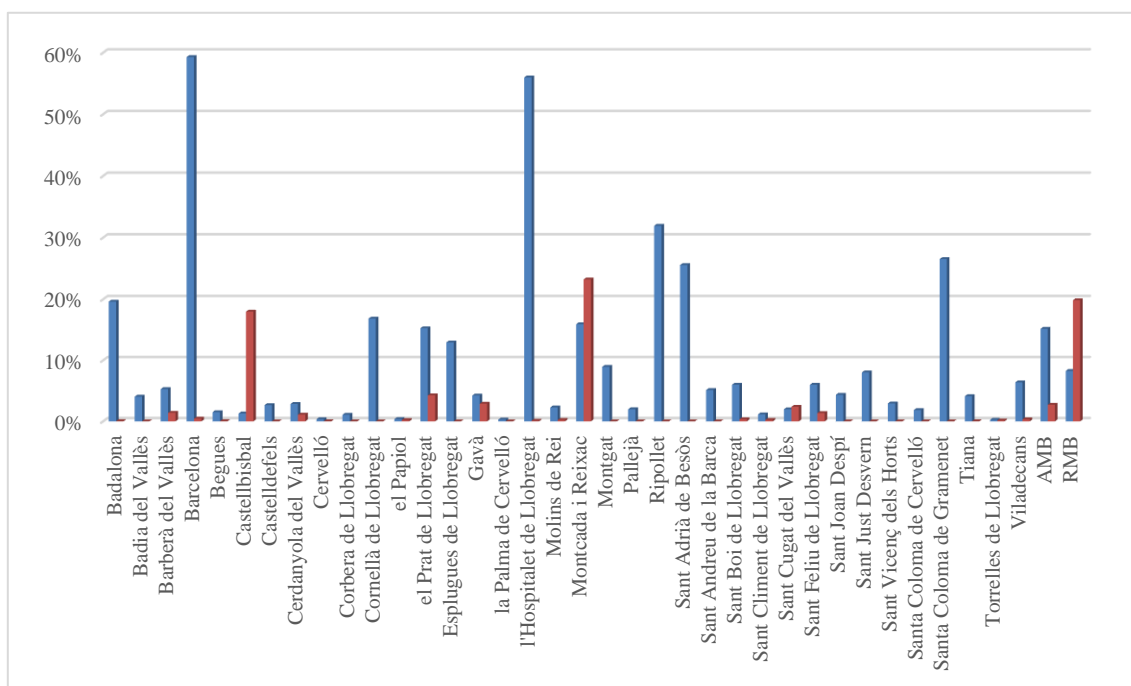
**Figura 30** Aplicació de *Agro-ecological Final EROI* –AFEROI (producte final –FP / inputs totals consumits –TIC + biomassa no collida –UB) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009.



**Figura 31** Aplicació de *Biodiversity EROI* –BEROI (biomassa no collida –UB / inputs totals consumits –TIC + biomassa no collida –UB) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009.



**Figura 32** Percentatge del producte ramader respecte el total en el càlcul de *Final EROI* –FEROI (producte final –FP / inputs totals consumits –TIC) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 (blau) i 2009 (vermell).



**Taula 5** Evolució dels EROIs econòmics<sup>1</sup> i els EROIs agro-ecològics<sup>2</sup> a l'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB), i la regió de Barcelona (RMB); 1956 – 2009.

EROIs Econòmics		FEROI 1956	FEROI 2009	EFEROI 1956	EFEROI 2009	IFEROI 1956	IFEROI 2009
		AMB	0.32	0.30	0.44	0.34	1.22
RMB		0.64	0.22	1.38	0.26	1.19	1.38
EROIs Agroecològics		NPPEROI 1956	NPPEROI 2009	AFEROI 1956	AFEROI 2009	BEROI 1956	BEROI 2009
		AMB	0.71	0.79	0.20	0.12	0.38
RMB		1.05	0.72	0.24	0.11	0.63	0.50

Notes: <sup>1</sup> EROIs econòmics: *Final EROI* –FEROI (retorn a la societat de l'energia invertida), *External Final EROI* –EFEROI (relació entre inputs externs i producció final), *Internal Final EROI* –IFEROI (eficiència en que la biomassa reciclada es transforma en producte final). <sup>2</sup> EROIs agroecològics: *Net Primary Production EROI* –NPPEROI (capacitat productiva de l'agro-ecosistema); *Agro-ecological Final EROI* –AFEROI (energia necessària per obtenir biomassa per la societat); *Biodiversity EROI* –BEROI (energia disponible per les cadenes tròfiques).

### 4.3. Anàlisi multi-escalar

En la anàlisi multi-escalar s'estudia com s'integren les funcions de diferents components d'un agro-ecosistema. Es veurà com, en l'evolució cap a una agricultura industrial, la millora de la productivitat per unitat de bé fons es fa en detriment de l'eficiència energètica (com es demostra en l'apartat 4.2) però també a costa d'una pèrdua de la multi-funcionalitat de l'agro-ecosistema. A més, es veurà com existeix una relació directa entre la pèrdua de multi-funcionalitat i la pèrdua d'eficiència. S'analitza la relació entre bens fons (usos del sòl / treball vs cabanya ramadera) i entre aquests i els fluxos d'energia.

#### 4.3.1. Usos del sòl i ramaderia

El creixement urbà i de vies de comunicació ha sigut el principal vector de canvi a l'AMB entre 1956 i 2009 (Figura 33), passant del 14% al 44% d'ocupació del sòl, en detriment de superfícies conreades, sobretot conreus herbacis, que van baixar del 25% a només el 6%. La superfície de prats, matollars i boscos no va canviar gaire, tot i la transició forestal (increment d'11 km<sup>2</sup> de boscos). A l'RMB la tendència és similar: creixement de la superfície urbana i transició forestal, descens dels conreus i creixement dels prats.

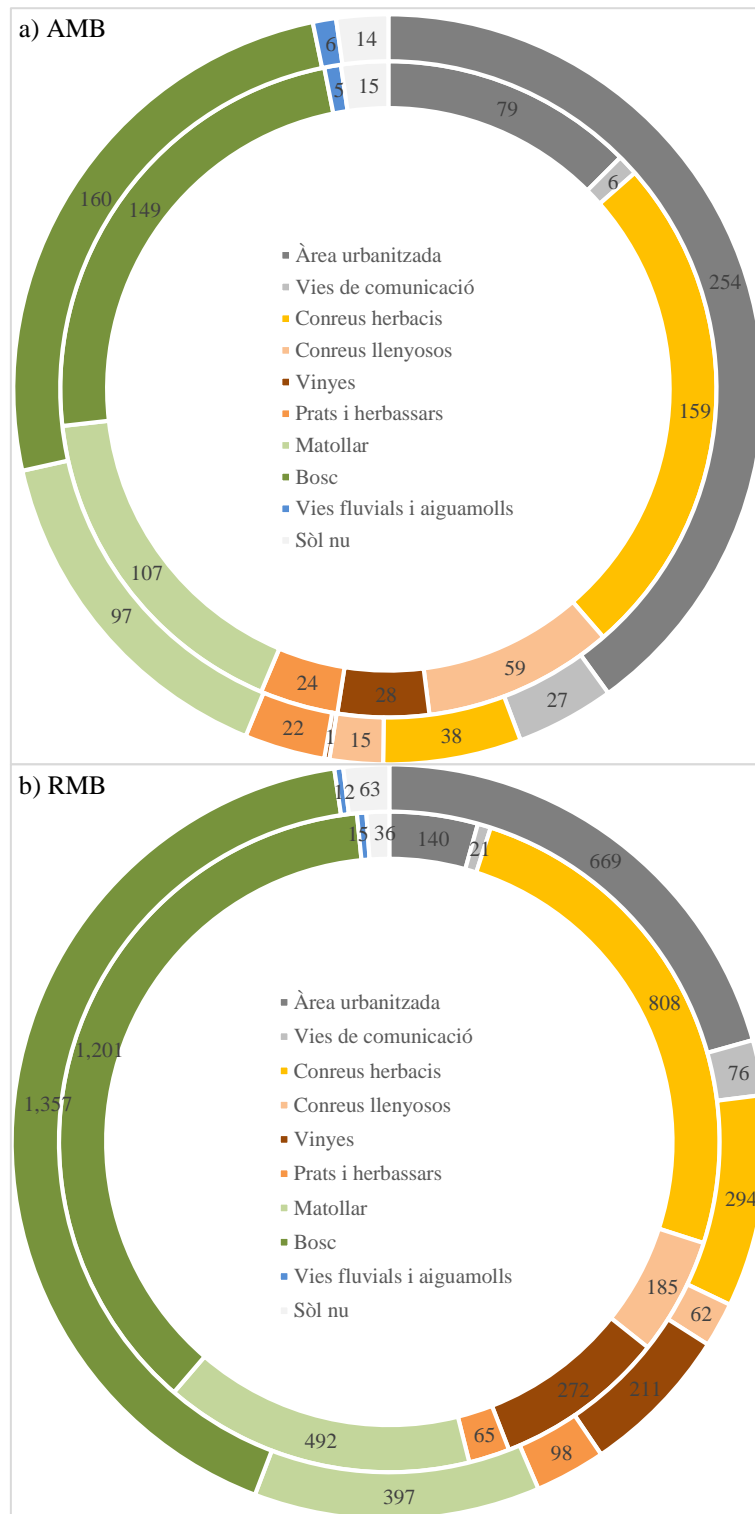
Si posem el focus en els espais oberts (Figura 34), el bosc representa l'ús principal (2009), però l'aprofitament del bosc ha minvat en les darreres dècades (tant l'extracció llenyosa com la pastura) i, per tant, el perill d'incendis ha crescut notablement. Per contra, els cultius herbacis han minvat molt. La vinya gairebé ha desaparegut a l'AMB tot i que al conjunt de l'RMB s'ha mantingut degut a l'especialització de l'Alt Penedès. Si des de la perspectiva econòmica l'especialització pot ser eficient, des de l'economia circular (que requereix d'un agro-ecosistema integrat i equilibrat) emergeixen importants reptes.

En quant la ramaderia (Figura 34), s'observa una forta baixada a l'AMB (-91%) i una important pujada a l'RMB (+40%) de les unitats ramaderes totals en el període 1956-2009. A l'AMB destacaven el boví (a Barcelona, el Prat, l'Hospitalet i Badalona) i els èquids (principalment cavalls al municipi de Barcelona) a més d'un curiós resultat en quant al porcí a l'Hospitalet. Al 2009 ja queden pocs animals a Castellbisbal (boví i aviram), Gavà (porcí) i Montcada (porcí i aviram). Per contra, a l'RMB els ruminants d'engreix (boví, oví i cabrum) es van mantenir, mentre que els èquids es van reduir en més d'un 90% (degut a que la seva funció com animals de tir s'ha substituït per maquinària). Finalment, el porcí, que constituïa només el 4% de les unitats ramaderes, ara representa el 50%; i l'aviram i els conills també han incrementat molt (+346%).

A l'RMB els ruminants han baixat i s'han disparat porcí, aviram i conills. Aquests, si bé són més eficients en transformar els aliments en creixement animal, competeixen amb l'alimentació humana en l'ús de les terres de cultiu. Per altra banda, els ruminants són més eficients en transformar les restes de conreu, com la palla, així que es complementen amb l'alimentació humana en les terres de cultiu i faciliten la circularitat de l'economia.

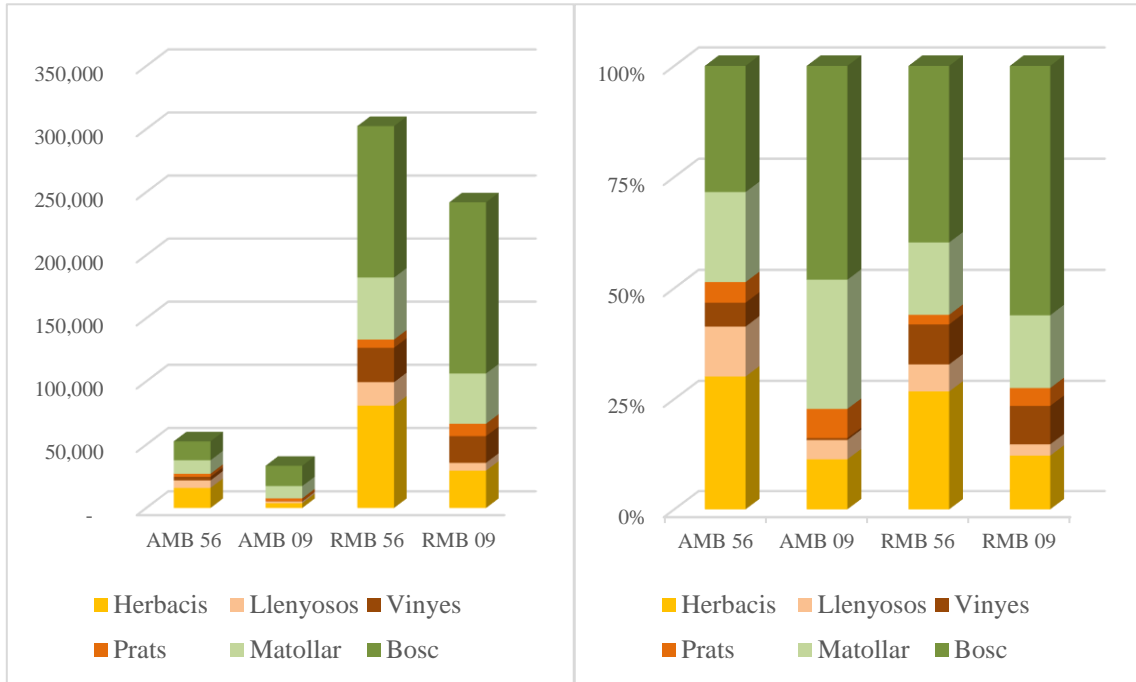
En el període d'anàlisi (1956-2009) augmenta l'àrea urbanitzada i la transició forestal, i baixa notablement la superfície cultivada. La ramaderia baixa a l'AMB i s'incrementa a l'RMB (baixen els ruminants i puja el porcí)

Figura 33 Evolució del percentatge de cobertes del sòl a l'àrea (AMB; a) i la regió (RMB; b) metropolitana de Barcelona, en el període 1956 (cercle intern) – 2009 (cercle extern).

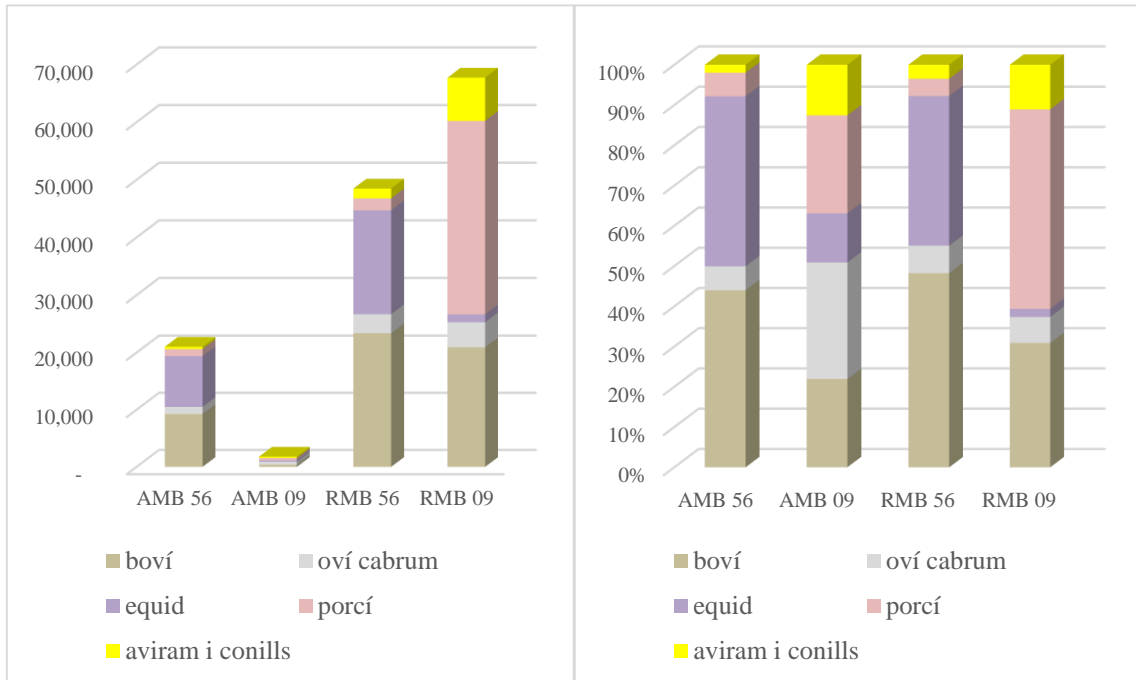


**Figura 34** Superfície (ha) i composició (%) dels espais oberts (a) i la cabanya ramadera (b) a l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona; 1956–2009.

a) Espais oberts



b) Cabanya ramadera





#### 4.3.2. Treballadors i ramaderia

La primera evidència que cal destacar a l'AMB és que els agro-ecosistemes tenen una menor dimensió degut al creixement de la coberta urbana entre 1956 i 2009. Combinat amb l'augment de la població, el resultat és una important caiguda en la quantitat de terra conreada i de la terra agrícola per habitant (Taula 6).

S'observa que la disminució de terres conreades ha sigut més important que la disminució total d'espais oberts (Figura 34). Això és, en part, degut a la transició forestal en detriment dels conreus. Per molt que la productivitat per hectàrea hagi crescut, l'efecte final es un increment de la importació d'aliments a l'AMB, una major dependència de sistemes agrícoles externs al territori i, per tant, una menor sobirania alimentària.

En canvi, amb la disminució de la quantitat de terra per habitant, s'observa un creixement de la disponibilitat de terra conreada per treballador agrícola, que gairebé quadruplica a l'AMB i triplica a l'RMB (Taula 6). Això és degut a la creixent disponibilitat de maquinària per pagès entre 1956 i 2009, tant a l'AMB com a l'RMB. Per una banda ha facilitat les tasques agrícoles, i per l'altra ha substituït la força de treball d'animals de tir.

Tot i que les terres conreades per pagès s'han triplicat o quadruplicat, la potència disponible s'ha multiplicat per un factor de 100 o gairebé 150 a l'AMB i l'RMB, respectivament (Taula 6). El resultat és que la potència disponible per terra conreada també s'ha multiplicat, d'entre 20 a gairebé 40 vegades a l'AMB i l'RMB. Però, com s'ha observat en l'apartat 4.3.1, l'augment de la productivitat del treball suposa una major dependència de l'energia fòssil i una menor eficiència input-output (FEROI, EFEROI).

La cabanya ramadera a mitjans del segle XX desenvolupava múltiples funcions: els animals de tir suplien l'actual maquinària, els de corral en bona part s'alimentaven de restes domèstiques, els ruminants podien digerir els excedents dels conreus com la palla, i els de pastura contribuïen al manteniment dels pastos i la neteja de boscos. A més, tota la cabanya ramadera aportava els seus fems a la fertilització de les terres de conreu.

La relació entre cobertes del sòl i tipologies d'animals estava equilibrada (1956) i permetia el manteniment d'un mosaic paisatgístic d'alt valor agroecològic. L'equilibri territorial es trenca amb la mecanització de l'agricultura, la creixent urbanització, l'abandonament d'activitats ramaderes i de la pastura de prats i boscos, la reducció de ruminants (que millor aprofitaven la circularitat de l'economia) i la introducció de granges industrials en les quals s'importen pinsos procedents de fora del territori.

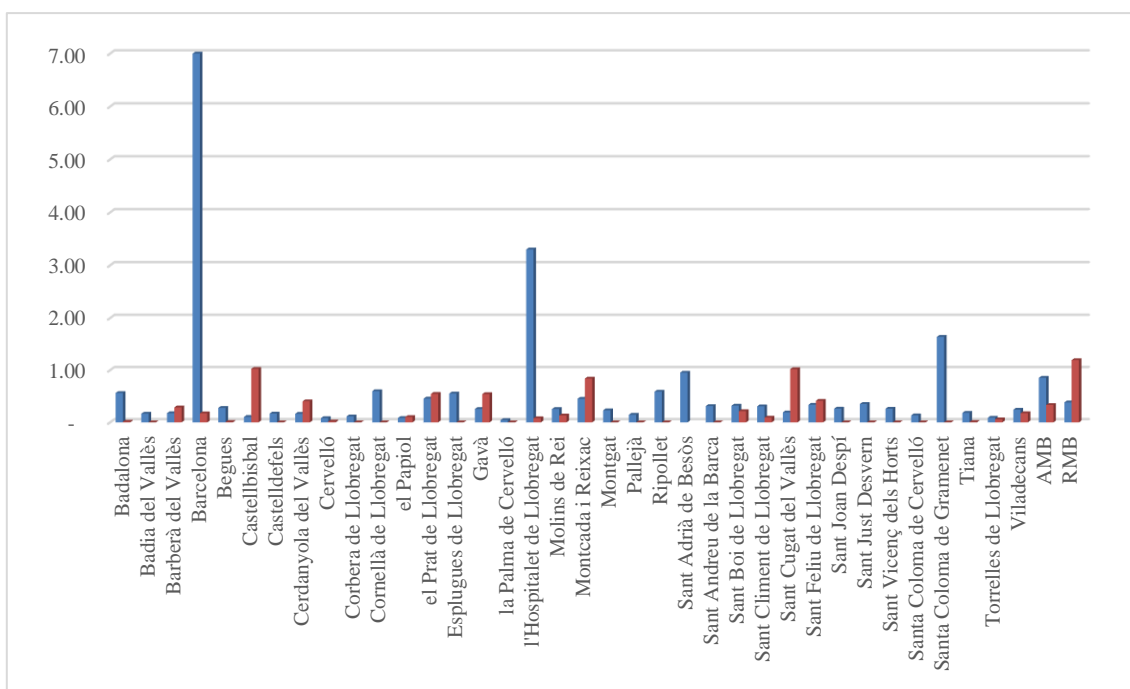
En una agricultura multi-funcional existeix una complexa relació entre els fluxos d'energia i materials i els bens fons, el que permet el sosteniment del sistema i minimitza la dependència d'inputs externs. Quan l'equilibri es trenca, la ineficiència augmenta, bé perquè falten animals per fertilitzar les terres, bé perquè sobren al punt que l'excés de purins pot contaminar –en alguns municipis de l'RMB- la terra i els aqüífers.

En el període d'anàlisi (1956-2009) es trenca l'equilibri territorial per la mecanització de l'agricultura, l'abandonament d'activitats ramaderes i pastura als boscos, la reducció de ruminants i la introducció de granges industrials

**Taula 6** Composició dels espais oberts (a) i la cabanya ramadera (b) a l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona, en el període 1956–2009.

	Superfície de conreu (ha) / treballador	Unitats ramaderes totals / treballador	Unitats ramaderes totals / Superfície de conreu (ha)	Potència / Superfície de conreu (ha)	Potència / treballador	Superfície de conreu (m <sup>2</sup> ) / habitant	Animals (kg) / habitant
AMB 1956	1,18	0,99	0,85	0,64	0,76	122	5,21
AMB 2009	5,68	1,89	0,33	13,47	76,5	18	0,28
RMB 1956	2,03	0,78	0,38	0,3	0,61	493	9,45
RMB 2009	7,76	9,27	1,19	11,67	90,53	113	6,78

**Figura 35** Unitats ramaderes totals / superfície de conreu (ha) als municipis i el total de l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona, en el període entre 1956 (blau) i 2009 (vermell).



L'elevada presència de vaqueries i cavalls a Barcelona i de porcs a l'Hospitalet el 1956 (Figura 35) constituïen una sobrecarrega potencial pel sistema agrícola i, per tant, contaminació d'aqüífers si es tiraven fems i purins a les terres de cultiu del municipi. Però és possible que pel cas urbà no fos així i que fems i purins sortissin pel sistema de clavegueram. El 2009 s'observa que a Castellbisbal, Montcada i Reixac i Sant Cugat existeix una elevada càrrega ramadera, tot i que inferior a la mitjana de l'RMB, on es supera el valor d'una unitat ramadera per hectàrea de conreu.

Entre 1956 i 2009 es produeix una caiguda de la càrrega ramadera per hectàrea de cultiu a l'AMB (Figura 35). Això s'explica perquè la superfície conreada disminueix en un 78% mentre que la cabanya ramadera ho fa en un 91%. Per contra, al conjunt de l'RMB, davant una disminució del 55% de les terres conreades, la cabanya ramadera creix un 40%. Aquesta divergència representa, segon el nostre model, un problema de contaminació per purins en alguns municipis, sobretot al Vallés Oriental. A més, genera un desequilibri en la relació entre terres conreades i capacitat d'alimentar la cabanya ramadera.

Aquest creixement de les unitats ramaderes del 40% a l'RMB coincideix amb un augment de la població de quasi un 50% en el període d'anàlisi (Taula 6), de forma que si al 1956 hi havia 9.5 kg (equivalent en pes viu animal) per habitant, al 2009 hi havia 6.78 kg per habitant. Si bé és aparentment lògica l'afirmació de que si la població creix també han d'augmentar les unitats ramaderes, l'enorme disminució de terres conreades per habitant (de 492 m<sup>2</sup> a 113 m<sup>2</sup> per habitant) –i, per tant, les terres conreades per unitat ramadera– fa que no tingui cap sentit agro-ecològic, ja que suposa una major dependència de la importació tant d'aliment humà com de pinsos.

Des de la perspectiva de l'eficiència del transport, és més sostenible importar productes finals animals que tots els pinsos requerits pel seu creixement; però des de la perspectiva de l'economia circular representa la màxima ineficiència, ja que la desproporcionada quantitat de fems i purins en relació a les terres conreades a l'RMB –i, en conseqüència, la contaminació que produeix– fa que un mateix recurs que té valor en l'economia circular es transforma en un doble problema: de forma directa a l'RMB i de forma indirecta a les zones d'origen dels cultius per a pinsos, ja que allà s'haurà de fertilitzar la terra.

Una economia circular hauria de reinvertir fems i purins per la fertilització dels cultius per a pinsos. Això era possible en el passat, quan l'escala era molt més local. Avui, s'hauria de –almenys– concentrar la producció animal allà on es troben els cultius per a pinsos i moure només el producte animal cap a les zones urbanes de consum final.

Finalment, cal destacar que el creixement de la productivitat del treball mitjançant la industrialització també s'observa en la relació d'unitats ramaderes per treballador (Taula 6), que a l'RMB van passar de 0,78 a 9,27 en el període 1956-2009 (mentre que a l'AMB es van mantenir, poc per sota d'una unitat ramadera per treballador).

En una economia metropolitana més circular s'hauria de concentrar la producció animal allà on es troben els cultius per a pinsos, i moure el producte animal cap a les zones urbanes de consum final de proximitat

### 4.3.3. Relació entre bens fons i fluxos d'energia

Si bé les relacions entre bens fons ens permeten avaluar l'equilibri des agro-ecosistemes, les relacions entre fluxos d'energia i bens fons ens permeten analitzar les intensitats –i, per tant, la sostenibilitat– de les explotacions agràries i ramaderes. Es tracta de combinar la anàlisi multi-EROI dels fluxos d'energia (apartat 4.2) amb la anàlisi multi-escalar dels bens fons (apartats 4.3.1 i 4.3.2). Es descomponen els elements principals que configuren els EROIs (*Final Product* –FP, *Biomass Reused* –BR, *External Input* –EI; Figura 6) i es relacionen per unitat de terra (conreus, prats, matollars, bosc), per potència de la maquinaria (GJ de producte per cv instal·lat), i per població –total i pagesa.

#### *El cas del producte final (FP)*

La productivitat per hectàrea (FP/ha) baixa entre 1956 i 2009, tant a l'AMB com a l'RMB (Taula 7). Des de la perspectiva multi-escalar, aquest fet es deu a dos factors. D'una banda, la productivitat de la terra conreada augmenta, però la proporció de terra conreada sobre el total baixa i, per tant, l'aportació al FP baixa respecte el 1956. Per altra banda, els boscos, que representen l'ús principal tant a l'AMB com a l'RMB, es troben sovint en una situació d'abandonament i la productivitat per hectàrea disminueix.

Tot i la disminució de superfície conreada a l'AMB (Taula 7), FP puja degut a l'increment de la productivitat per hectàrea (de 16 a 75 GJ/ha). El motiu és el destí de molts sub-productes dels conreus (com la palla) i de molts cultius farratgers cap a FP, ja que la ramaderia a l'AMB té una importància molt petita (el producte animal disminueix gairebé 100 vegades). Per altra banda, la productivitat de cultius llenyosos, vinya i bosc ha minvat –amb una disminució de FP a menys de la meitat a l'AMB. Això es degut a que mentre que per 1956 el nostre model calcula l'aprofitament per consum domèstic de la llenya de poda y un aprofitament del bosc per llenya i fusta, al 2009 no es considera.

La multi-funcionalitat dels cultius llenyosos s'ha perdut. I no tan sols pel fet que no s'aprofita la remulla de la poda com a fons d'alimentació ramadera, sinó que tampoc s'aprofita la llenya que, des de la perspectiva energètica, representa la part més important d'aquests cultius: en la Taula 7 s'observa com a la vinya no s'aprofiten 46 GJ/ha de resta de poda (que es crema al camp), i a la resta de cultius llenyosos no s'aprofiten més de 36 GJ/ha pels mateixos motius. Finalment, el bosc a l'AMB, tot i mantenir-se en superfície, ha perdut el potencial productiu que tenia, i ha passat d'un aprofitament com a FP de gairebé 17 GJ/ha a només 5,4 GJ/ha. També ha perdut el potencial com a pastura –que el model assumeix per 1956 i no per 2009 (això s'analitzarà en relació a BR; Taula 9).

També s'observa una caiguda del FP a l'RMB deguda a la pèrdua d'extracció, tant al bosc com als cultius (excepte la vinya, que ha guanyat pes). Altra diferència respecte a l'AMB és l'increment del FP d'origen animal, que augmenta considerablement. Per això, el FP dels conreus herbacis no és tan elevat com a l'AMB (els residus d'aquests cultius a l'AMB es consideren FP, mentre que a l'RMB es consideren biomassa reutilitzada per la cabanya ramadera). D'altra banda, FP disminueix en el cas de cultius llenyosos (no vinya) –degut al malbaratament que es fa cremant al camp les restes de poda. De no ser així, el potencial energètic de la llenya podada seria molt més gran que l'actual extracció.

### *El cas dels inputs externs (EI)*

Es consideren dos categories de EI: els inputs que s'apliquen a la terra (fertilitzants, biocides, maquinaria, treball humà, llavors, electricitat); i els que s'apliquen a la ramaderia per l'alimentació animal. Els inputs a la terra han crescut molt (Taula 8) mentre que a la ramaderia (degut a l'important pes de la cabanya ramadera al Barcelonès al 1956 i el conseqüent abandonament de l'activitat al present) han crescut en menor quantitat.

Els EI baixen a l'AMB per la reducció de la cabanya ramadera –que ja al 1956 depenia d'importacions de pinso i palla- i pugen considerablement al conjunt de l'RMB (Taula 8). La reducció de EI a l'AMB es deguda a la menor necessitat d'alimentació animal, mentre que als conreus i al bosc hi ha un increment de EI tot i la disminució de les superfícies conreades. També a l'RMB, on augmenten els EI a la cabanya ramadera, l'increment de EI als conreus i bosc es major. Així, s'observa que els inputs per hectàrea s'incrementen en més d'un ordre de magnitud, de menys de 10 GJ/ha a més de 100 GJ/ha.

### *El cas de la biomassa reutilitzada (BR)*

Aquesta nova anàlisi energètica és rellevant per entendre la diferència entre un agroecosistema multifuncional –economia circular (s'aprofiten els fluxos de biomassa entre diferents usos del sòl i la cabanya ramadera, i els fluxos de tornada que van de la cabanya cap als conreus) i una explotació agrícola industrial –economia convencional.

Com s'ha vist en els EROIs (apartat 4.2), l'eficiència energètica de la transformació de pinso animal en engreix, i per tant producció animal (carn, ous, llet, pells), no és tan eficient com la producció vegetal (fotosíntesis). És important mantenir una cabanya ramadera proporcionada a les disponibilitats que un agro-ecosistema té per alimentar-la.

La ramaderia és un potencial agent multifuncional que, si es gestiona de forma agroecològicament eficient, pot aprofitar les restes dels conreus, els pastos (si no s'utilitzen es transformen en matollars i després boscos, amb pèrdua de mosaic paisatgístic) i els boscos (si no s'utilitzen augmenta el risc d'incendis), proporciona fertilització per als conreus i, si s'escau, tracció animal. Això permet que la dependència dels EI sigui menor, amb beneficis en estalvi energètic. La cabanya ramadera permet la transferència de fertilitat, amb la pastura de prats i boscos. Els animals estabulats només s'alimenten amb productes dels conreus (que requereixen l'ús de terres fèrtils i d'energia per treballar-les).

Si es trenca l'equilibri entre terra conreada i cabanya ramadera (relació que a l'RMB passa de 0,38 a 1,19 unitats ramaderes per hectàrea) i, amb l'estabulació dels animals, es deixen d'aprofitar prats i boscos, llavors es produeix una ulterior dependència de fora del territori (importació de pinsos). Aquest seria el cas d'una explotació agrícola industrial no circular: estabulació permanent i desequilibri entre conreus i ramaderia, generant dependència de EI i problemes en l'ecologia del paisatge. La Figura 37 mostra la relació entre EI, FP i BR –de la terra a la cabanya i de la cabanya a la terra (conreus).

Es produeix un canvi en la relació entre BR i EI, amb un equilibri diferent entre els bens fons terra i ramaderia. A la terra, amb la introducció de maquinaria i fertilitzants minerals,

baixa BR i puja EI, així que EFEROI baixa molt, IFEROI puja i FEROI baixa. A la cabanya, amb l'estabulació creix la dependència de productes de conreu i disminueix el pes de la pastura. La densitat ramadera a l'AMB baixa (de 0,85 a 0,45 unitats ramaderes / ha conreu), els productes i sub-productes del conreu es consideren com FP i, per tant, la baixada de FEROI –deguda a la introducció de maquinaria- es compensa i no baixa tant (de 0,29 a 0,27). En canvi, la densitat ramadera a l'RMB puja, s'han d'importar pinsos que ni la pastura ni els conreus locals poden oferir i, per tant, FEROI baixa ulteriorment.

La biomassa enterrada i les llavors augmenten entre 1956 i 2009 (Taula 9). Aquest fet, aparentment contradictori, s'explica perquè la biomassa enterrada creix amb les restes d'horta que, al 1956 i segon el nostre model, s'aprofitaven per l'alimentació animal. Les següents columnes de la Taula 9 representen els fluxos de biomassa entre diferents usos del sòl i la cabanya. S'observa que s'han deixat d'aprofitar els boscos i la remulla dels conreus llenyosos; a més, la pastura s'aprofita mínimament amb una extracció per hectàrea que, al 2009, és entre 10 i 20 vegades inferior. Amb la combinació de menors terres de conreu i un desaprofitament de pastos i boscos, l'aportació de l'agro-ecosistema a la cabanya baixa, tant a l'AMB com a l'RMB, tal com s'observa en la Figura 36.

La pèrdua d'eficiència no és només una qüestió energètica (per exemple, a l'RMB passa de gairebé 5 milions de GJ a una mica més de 2 GJ). Cal territorialitzar aquests fluxos i observar com s'abandona l'aprofitament ramader sobre diverses tipologies de cobertes del sòl (vinya, resta de conreus llenyosos, boscos i, en bona mesura, prats). Aquestes cobertes es poden gestionar amb intervenció humana directa (neteja de boscos i manteniment d'espais oberts, amb treball i maquinaria) o s'abandonen resultant en una transició forestal que pot generar la disminució d'heterogeneïtat del paisatge.

La intensificació en l'extracció de biomassa que prové de cultius herbacis per la ramaderia és també problemàtica, perquè posa l'alimentació animal en competència directa amb l'alimentació humana. El producte principal dels conreus hauria de destinar-se per alimentació humana, reservant els productes residuals (com la palla o la closca dels cereals) pels animals. Però s'observa com la proporció de palla sobre el pes del gra de cereal s'ha reduït amb les noves varietats (pel cas del blat i la civada va baixar de 220% i 218% al 1956 a 38% i 34% el 2009, respectivament). A més, la proporció de superfície conreada per farratges i cereals per pinso (ordi, blat de moro, civada i sègol) s'ha gairebé doblat (només tenim dades per la província de Barcelona: del 33% al 72%).

Tot i el creixement relatiu en BR dels cultius herbacis cap a la cabanya, la quantitat de biomassa importada de fora de l'RMB ha augmentat (de 42 a 51 GJ/unitat ramadera), degut a la pèrdua de superfície conreada i al creixement de la cabanya total. A l'AMB, els fluxos de biomassa per unitat ramadera han pujat (malgrat el desaprofitament de pastos i boscos) degut al molt inferior pes de la cabanya. Al conjunt de l'RMB, el 2009 només es registren 33GJ / unitat ramadera, que és 3 vegades inferior al valor de 1956.

La recirculació de biomassa entre usos del sòl i cabanya ramadera és bàsica per entendre la diferència entre un agro-ecosistema multifuncional –economia circular, i una explotació agrícola industrial –economia convencional



**Taula 7** Producte final (*Final Product –FP*) total (GJ), per unitat de superfície (GJ/ha) i per residus (GJ/ha)<sup>1</sup>, en relació al tipus de conreu i la cabanya ramadera, a l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona, en el període 1956–2009.

FP (GJ)	Herbació	Llenyosos	Vinya	Bosc	Animal	Total
AMB 1956	252.401	275.196	39.040	251.902	146.228	964,767
AMB 2009	287.051	30.786	3.845	86.591	1.561	409.088
RMB 1956	904.816	837.754	374.599	2.026.086	373.160	4.516.415
RMB 2009	409.785	121.021	580.713	1.576.309	637.290	3.212.432
FP (GJ/ha)	Herbació	Llenyosos	Vinya	Bosc	Animal	Total
AMB 1956	15,9	46,5	13,8	16,9	2,8	18,3
AMB 2009	75,1	21,1 (36,7) <sup>1</sup>	27,6 (57,1) <sup>1</sup>	5,4	0,3	12,6
RMB 1956	11,2	45,2	13,8	16,9	1,2	14,9
RMB 2009	13,9	19,4 (33,8) <sup>1</sup>	27,6 (57,1) <sup>1</sup>	11,6	2,6	13,3

Nota: <sup>1</sup> Entre parèntesi es calculen GJ/ha de residus produïts.

**Taula 8** Input extern (*External Input –EI*), total (GJ), per unitat de superfície (GJ/ha) i per ramaderia (GJ/unitats ramaderes)<sup>1</sup>, en relació al tipus de conreu i la cabanya ramadera, a l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona, en el període 1956–2009.

EI (GJ)	Herbació	Llenyosos	Vinya	Bosc	Animal	Total
AMB 1956	161.351	37.641	6.379	26.613	2.146.602	2.378.586
AMB 2009	904.109	158.652	22.227	162.897	105.036	1.352.920
RMB 1956	734.293	93.536	46.593	157.162	2.732.471	3.764.056
RMB 2009	4.675.141	520.813	2.803.011	2.476.367	4.118.715	14.594.047
EI (GJ/ha)	Herbació	Llenyosos	Vinya	Bosc	(Animal)	Total
AMB 1956	10,18	6,36	2,25	1,78	(96,92)	54,2
AMB 2009	238,76	108,69	159,32	10,15	(46,68)	40,6
RMB 1956	9,08	5,04	1,71	1,31	(41,83)	12,5
RMB 2009	158,76	83,65	133,05	18,25	(51,10)	60,3

Nota: <sup>1</sup> Entre parèntesi es calculen GJ/unitats ramaderes totals.



**Taula 9** Recirculació de biomassa (*Biomass reused* –BR), total (GJ), per unitat de superfície (GJ/ha) i per ramaderia (GJ/unitats ramaderes)<sup>1</sup>, en relació al tipus de conreu i els fluxos entre la cabanya ramadera i els conreus, a l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona, en el període 1956–2009.

BR (GJ)	Enterrats i llavors	Herbaciis	Llenyosos	Vinya	Prats	Bosc	De la terra a la cabanya	De la cabanya als conreus
AMB 1956	39.344	687.994	4.127	4.519	73.985	133.964	904.589	1.291.010
AMB 2009	50.968	140.335			3.070		143.406	77.552
RMB 1956	234.505	3.876.395	12.947	43.365	122.322	823.902	4.878.931	3.844.930
RMB 2009	315.343	2.234.491			21.703		2.256.194	2.765.859
BR (GJ/ha)	Enterrats i llavors	Herbaciis	Llenyosos	Vinya	Prats	Bosc	De la terra a la cabanya	De la cabanya als conreus
AMB 1956	2,48	43,40	0,70	1,59	30,43	8,97	43	52,47
AMB 2009	13,46	37,06			1,39		80	14,40
RMB 1956	2,90	47,95	0,70	1,59	18,82	6,86	101	30,37
RMB 2009	10,71	75,88			2,22		33	48,75

Nota: <sup>1</sup> Entre parèntesi es calculen GJ/unitats ramaderes totals.

**Figura 36** Origen de la recirculació de biomassa (GJ) cap a la cabanya ramadera a la regió metropolitana de Barcelona (RMB), en el període 1956–2009.

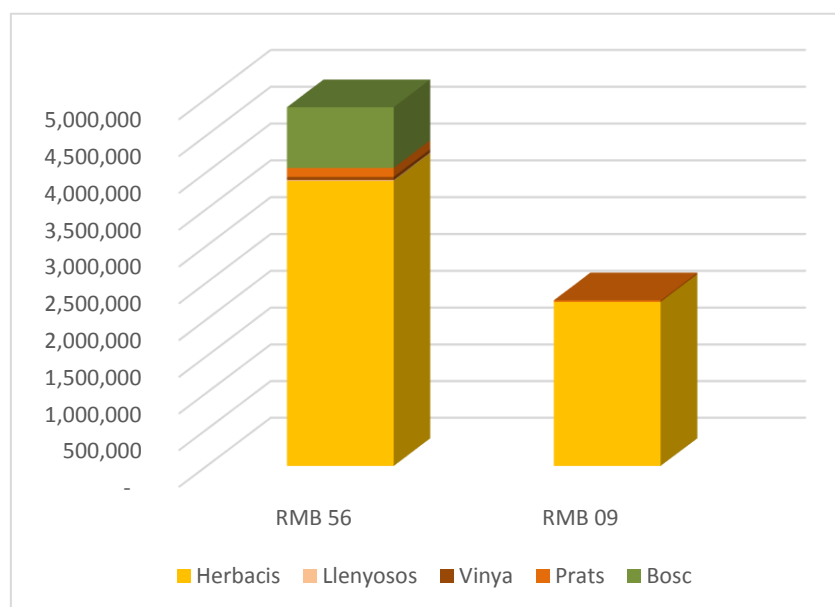
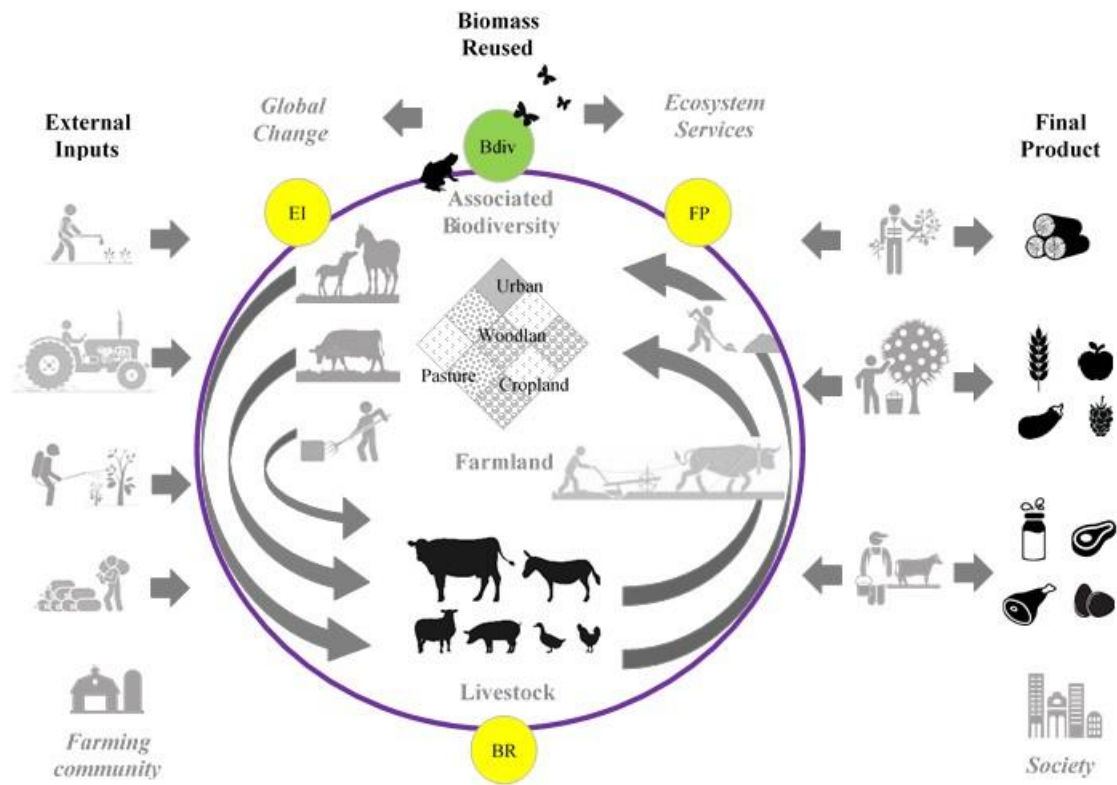


Figura 37 Esquema de la relació entre *External Inputs* (EI), *Final Product* (FP) i *Biomass Reused* (BR) –de la terra a la cabanya i de la cabanya a la terra-, així com la possible relació del metabolisme social amb la qualitat ecològica del territori, la biodiversitat que acull, els serveis ecosistèmics que ofereix a la societat i l'impacte en el canvi global. D'aquí ve l'interès de l'agricultura com infraestructura verda metropolitana (Figura 1).



Font: Elaboració pròpia.

#### 4.4. Anàlisi energia-territori

La anàlisi energia-territori posa a prova la hipòtesi de partida (apartat 1.6) que relaciona l'estructura funcional de la matriu territorial (complexitat del paisatge) amb l'energia disponible per mantenir els processos ecològics i la biodiversitat (pertorbació antròpica), mitjançant diferents usos del sòl (planificació del territori) a la metròpoli de Barcelona.

Hem desenvolupat dos models energia-territori (Figura 5): El Model de Pertorbació Intermedia – Complexitat (IDC; *Intermediate Disturbance – Complexity*), basat en HANPP (*Human Appropriation of Net Primary Production*), a escala regional (apartat 2.4); La Anàlisi Integrada Energia – Territori (ELIA; *Energy – Landscape Integrated Analysis*), basada en EROI (*Energy Return of Investment*), a escala local (apartat 2.5).

La anàlisi energia-territori parteix d'una base de dades (Taula 10) amb variables de fluxos d'energia, mètriques del paisatge i biodiversitat (ocells i papallones), realitzada a nivell de la província de Barcelona (311 municipis; 7.728 km<sup>2</sup>) –sobre la que s'aplica IDC, i de la regió metropolitana de Barcelona (164 municipis; 3.240 km<sup>2</sup>) –sobre la que s'aplica ELIA. Les bases socio-metabòliques provenen de la anàlisi multi-EROI (apartat 4.2), les bases de cobertes del sòl provenen de la anàlisi multi-escalar (apartat 4.3).

##### 4.4.1. Dades empíriques de biodiversitat

Les bases de dades de biodiversitat, obtingudes en el període 2005-2015, consisteixen en: Transsectes emprats per obtenir dades d'ocells (buffer lineal: 500 m) a la província (151 transsectes) i la regió (91 transsectes) de Barcelona (Figura 38); Transsectes utilitzats per obtenir dades de papallones (buffer circular: 750 m) a la província (56 transsectes) i la regió (41 transsectes) de Barcelona (Figura 39).

Una primera anàlisi a la província de Barcelona mostra resultats consistents i inquietants. Les observacions d'ocells nidificants experimenten un decreixement sostingut entre 2005 i 2015 (Figura 38), especialment en relació a espècies associades a l'agricultura (tant nidificants com hivernants). El constant decreixement de poblacions d'espècies d'ocells comuns, principalment relacionades amb els espais oberts (menor superfície agrícola, creixement urbà i transició forestal), és un problema de primer ordre a Europa, perquè inevitablement produirà una pèrdua d'espècies, especialment a les metròpolis.

En relació a les papallones, si bé les seves poblacions experimenten característiques oscil·lacions en el període d'anàlisi –de 2002 a 2015 (Figura 39), degut a factors externs –com ara canvis en el clima i floració de les plantes, es veu una tendència decreixent en el número d'espècies, principalment especialistes (es a dir, relacionades amb hàbitats i plantes concretes) i associades a espais oberts (com ara espais agrícoles o pastures).

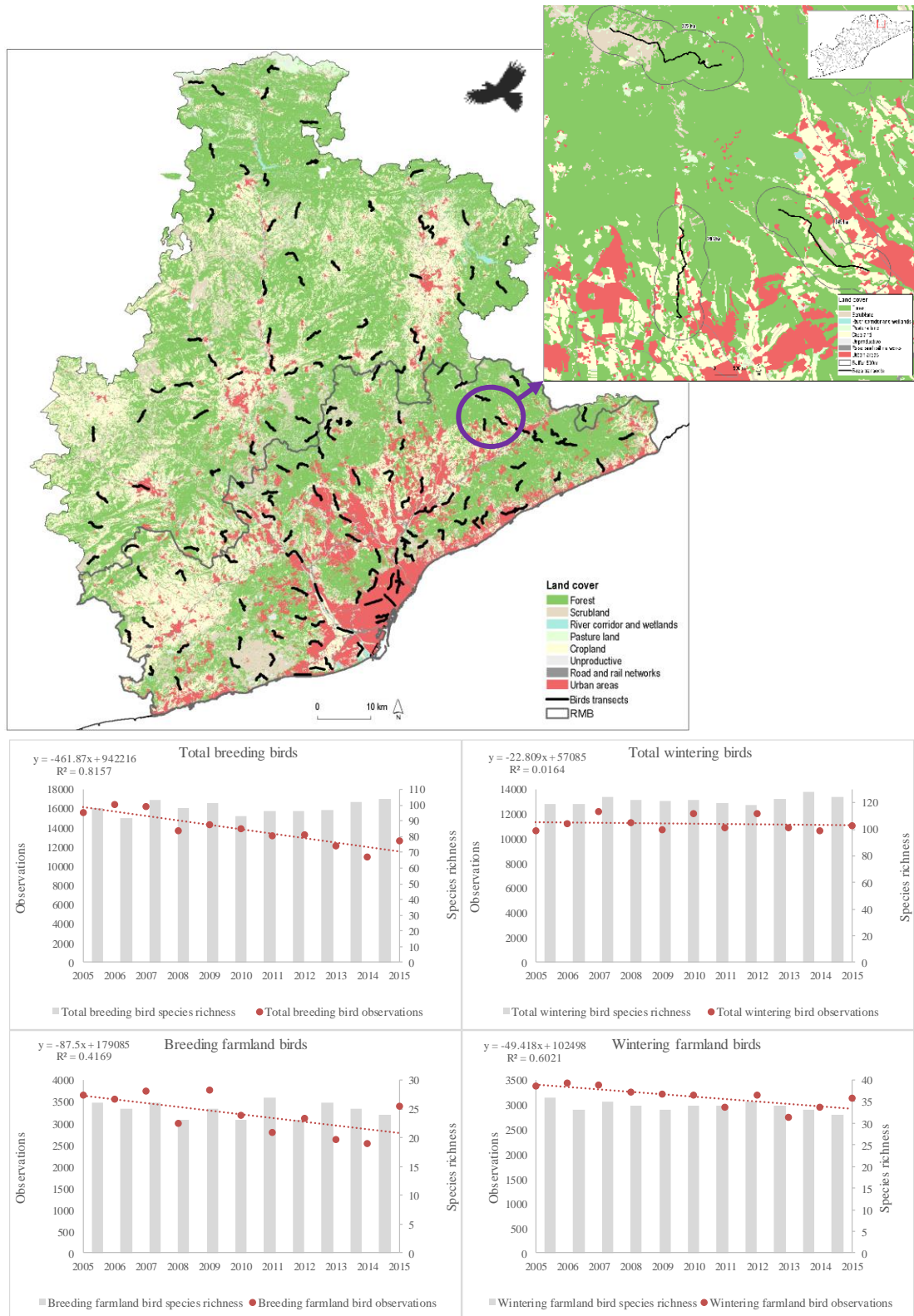
Aquestes dades empíriques de biodiversitat són preocupants i justifiquen la necessitat d'un planejament integrat del territori, on l'agricultura ha de tenir un paper clau com infraestructura verda, garantint els serveis ecosistèmics i estructurant la xarxa de ciutats.

Dades empíriques de biodiversitat en el període 2005-2015 mostren un preocupant descens en les poblacions d'ocells –associats a espais agrícoles, i la desaparició d'espècies de papallones –especialistes i d'espais oberts

**Taula 10** Base de dades amb variables d'energia, territori i biodiversitat, emprada per aplicar IDC (*Intermediate Disturbance – Complexity*) i ELIA (*Energy – Landscape Integrated Analysis*) a la província i la regió metropolitana de Barcelona, respectivament.

	Variables			RMB	PROV
	Typology	Code	Name		
Energy	Primary Energy Variables	FEI r	Farmland External Input renewable	*	
		FEI nr	Farmland External Input no-renewable	*	
		FEI	Farmland External Input	*	
		UB	Unharvested Biomass	*	
		FW	Farmland Waste	*	
		FBR	Farmland Biomass Reused	*	
		LBR	Livestock Biomass Reused	*	
		FFP	Farmland Final Produce	*	
		LEI R	Livestock External Input	*	
		LEI nr	Livestock External Input renewable	*	
		LEI	Livestock External Input no-renewable	*	
		LW	Livestock Waste	*	
		LS	Livestock Services	*	
	LFP	Livestock Final Produce	*		
	Secondary Energy Variables	NPPact	Actual Net Primary Production	*	
		NPPh	Harvested Net Primary Production	*	
		ATT	Agro-ecosystem Total Turnover	*	
		LTI	Livestock Total Input	*	
		LPS	Livestock Produce and Services	*	
		FTI	Farmland Total Input	*	
	Socio-economic Indicators	FII	Farmland Internal Input	*	
		EF-EROI	External - Energy Return of Investment	*	
		IF-EROI	Internal - Energy Return of Investment	*	
Agro-ecological Indicators	F-EROI	Final - Energy Return of Investment	*		
	NPP-EROI	Net Primary Production - Energy Return of Investment	*		
	AF-EROI	Agro-ecological - Energy Return of Investment	*		
Energy Indicators	B-EROI	Biodiversity - Energy Return of Investment	*		
	E	Energy Storage	*		
	Ee	Energy Effort	*		
	I	Energy Information	*		
		HANPP	Human Appropriation of Net Primary Production	*	*
Landscape	Landscape Composition	CR-LC	Cropland	*	*
		GR-LC	Grove	*	*
		VN-LC	Vineyard	*	*
		GS-LC	Grassland	*	*
		SC-LC	Scrubland	*	*
		FR-LC	Forest	*	*
		WT-LC	Wetland	*	*
		UN-LC	Unproductive	*	*
	UR-LC	Urban	*	*	
	Landscape Configuration	LPI	Largest Path Index	*	*
		PD	Polygon Density	*	*
		ED	Edge Density	*	*
		EMS	Effective Mesh Size	*	*
		L	Landscape Heterogeneity	*	*
ECI		Landscape Connectivity	*	*	
		Le	Landscape Ecology metric	*	*
Energy - Landscape	ELIA	ELIA	Energy - Landscape Integrated Analysis	*	
		IDC	Intermediate Disturbance Complexity	*	*
Biodiversity (transects)	Birds	TBB-SR	Total Breeding Bird Species Richness	69	96
		FBB-SR	Farmland Breeding Bird Species Richness		
		TBB-OB	Total Breeding Bird Observations		
		FBB-OB	Farmland Breeding Bird Observations		
		TWB-SR	Total Wintering Bird Species Richness		
		FWB-SR	Farmland Wintering Bird Species Richness		
		TWB-OB	Total Wintering Bird Observations		
		FWB-OB	Farmland Wintering Birds Observations		
	Butterflies	TB-SR	Total Butterfly Species Richness	23	34
		TB-OB	Total Butterfly Observations		
		OPE-SR	Open-space Butterfly Species Richness		
		OPE-OB	Open-space Butterfly Species Observations		
		CLOS-SR	Close-space Butterfly Species Richness		
		CLOS-OB	Close-space Butterfly Species Observations		
GEN-SR	Generalist Butterfly Species Richness				
GEN-OB	Generalist Butterfly Species Observations				
SPE-SR	Specialist Butterfly Species Richness				
SPE-OB	Specialist Butterfly Species Observations				

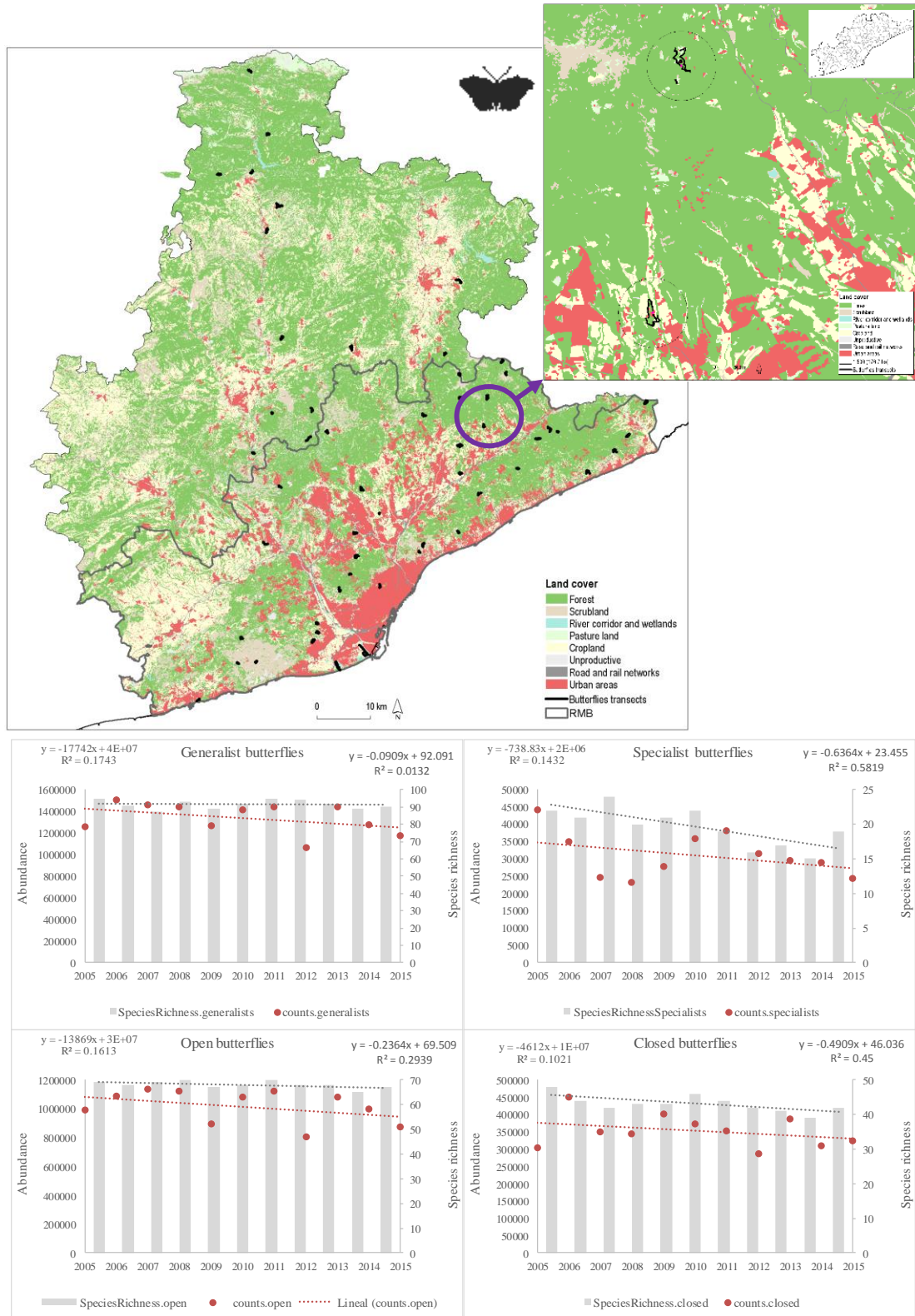
**Figura 38** Transsectes utilitzats per obtenir dades d'ocells (buffer lineal: 500 m) a la província (151 transsectes) i la regió (91 transsectes) metropolitana de Barcelona. Es mostra el canvi en la riquesa d'espècies i el número d'observacions per ocells nidificants i hivernants, totals i associats a l'agricultura, en el període 2005-2015.



Font: Institut Català d'Ornitologia (ICO) – Seguiment d'Ocells Comuns a Catalunya (SOCC).



**Figura 39** Transectes utilitzats per obtenir dades de papallones (buffer circular: 750 m) a la província (56 transectes) i la regió (41 transectes) metropolitana de Barcelona. Es mostra el canvi en la riquesa d'espècies i el número d'observacions per papallones generalistes o especialistes, d'espais oberts o d'espais tancats, en el període 2005-2015.



Font: Catalan Butterfly Monitoring Scheme (CBMS).

#### 4.4.2. Metabolisme i territori

Per estudiar com afecta el metabolisme social en els canvis dels usos del sòl i les propietats ecològiques del paisatge que, al seu torn, sostenen la biodiversitat, s'ha treballat amb dos models energia-territori (apartat 2.1): i) Un model aplicable a escala regional anomenat IDC (*Intermediate Disturbance – Complexity*), basat en HANPP (*Human Appropriation of Net Primary Production*) i Le (*Landscape Ecology Metric*); ii) I un model més precís, aplicable a escala local, anomenat ELIA (*Energy – Landscape Integrated Analysis*), basat en Le i una interpretació ecològica-territorial dels EROI (*Energy Return of Investment*), mitjançant la anàlisi dels cicles metabòlics interns, el que permet avaluar E (*Energy Storage*) i I (*Energy Information*), que mesuren l'energia reinvertida i redistribuïda en l'agro-ecosistema, respectivament (apartat 2.5).

L'aplicació d'aquesta interpretació ecològica-territorial dels cicles metabòlics interns dels agro-ecosistemes a l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona (Figura 40), incloent-hi les comarques Alt Penedès, Baix Llobregat, Barcelonès, Garraf, Maresme, Vallès Occidental i Vallès Oriental (Figura 41), en el període 1956-2009, permet visualitzar la transició d'una economia més circular, basada en la reinversió i redistribució en la matriu territorial de la biomassa procedent de la terra conreada (BR) i de la cabanya ramadera (BS), a una economia més lineal, basada principalment en els inputs externs (EI), en la seva major part no reutilitzables (fertilitzants, pesticides, etc.).

Com s'ha dit abans, l'elevada presència de vaqueries i cavalls a Barcelona i de porcs a l'Hospitalet el 1956, per alimentar a la ja notable població metropolitana, constituïen una sobrecarrega pel sistema agrícola al Barcelonès (GJ) (Figura 41) i el total de l'AMB (GJ/ha) (Figura 40). Tret d'aquest fet diferencial, i de que cadascuna de les comarques presenta les seves especificitats, en el període 1956-2009 s'observa un tret general que és l'espectacular increment dels inputs externs (EI) no renovables (FEInr), que tanmateix no aconseguixen augmentar en la mateixa proporció el producte final (FP), el que porta a una elevada ineficiència energètica (apartat 4.2) i a una important desconexió de l'agricultura en relació al sistema socioecològic metropolità (apartat 4.3).

Aquesta manca de reinversió (E) i redistribució (I) dels fluxos energètics dins la pròpia matriu territorial (simplificant el sistema agrícola mitjançant el consum massiu de EI), porta a la pèrdua de l'estructura territorial característica dels nostres paisatges bio-culturals, disminuint l'heterogeneïtat i la connectivitat dels mosaics d'usos del sòl (Le), que històricament han mantingut els processos ecològics i la biodiversitat a l'àmbit d'estudi (veure mapes dels models energia-territori a les Figura 43 i Figura 44). En el període 1956-2009, s'observa a l'AMB, l'RMB i les diferents comarques, una disminució notable en els valors dels models IDC i ELIA (Figura 42), impacte que resulta especialment remarcable en el cas del Barcelonès i l'AMB.

Els models energia-territori en el període 1956-2009 permeten quantificar la pèrdua de circularitat dels fluxos d'energia (dependència d'inputs externs) i la conseqüent desvinculació d'una matriu territorial ecològicament funcional



Figura 40 Canvi en els cicles metabòlics interns dels agro-ecosistemes, segons l'esquema conceptual que segueix el model energia –territori ELIA (*Energy – Landscape Integrated Analysis*), a la regió i a l'àrea metropolitana de Barcelona (en GJ/ha); 1956-2009.

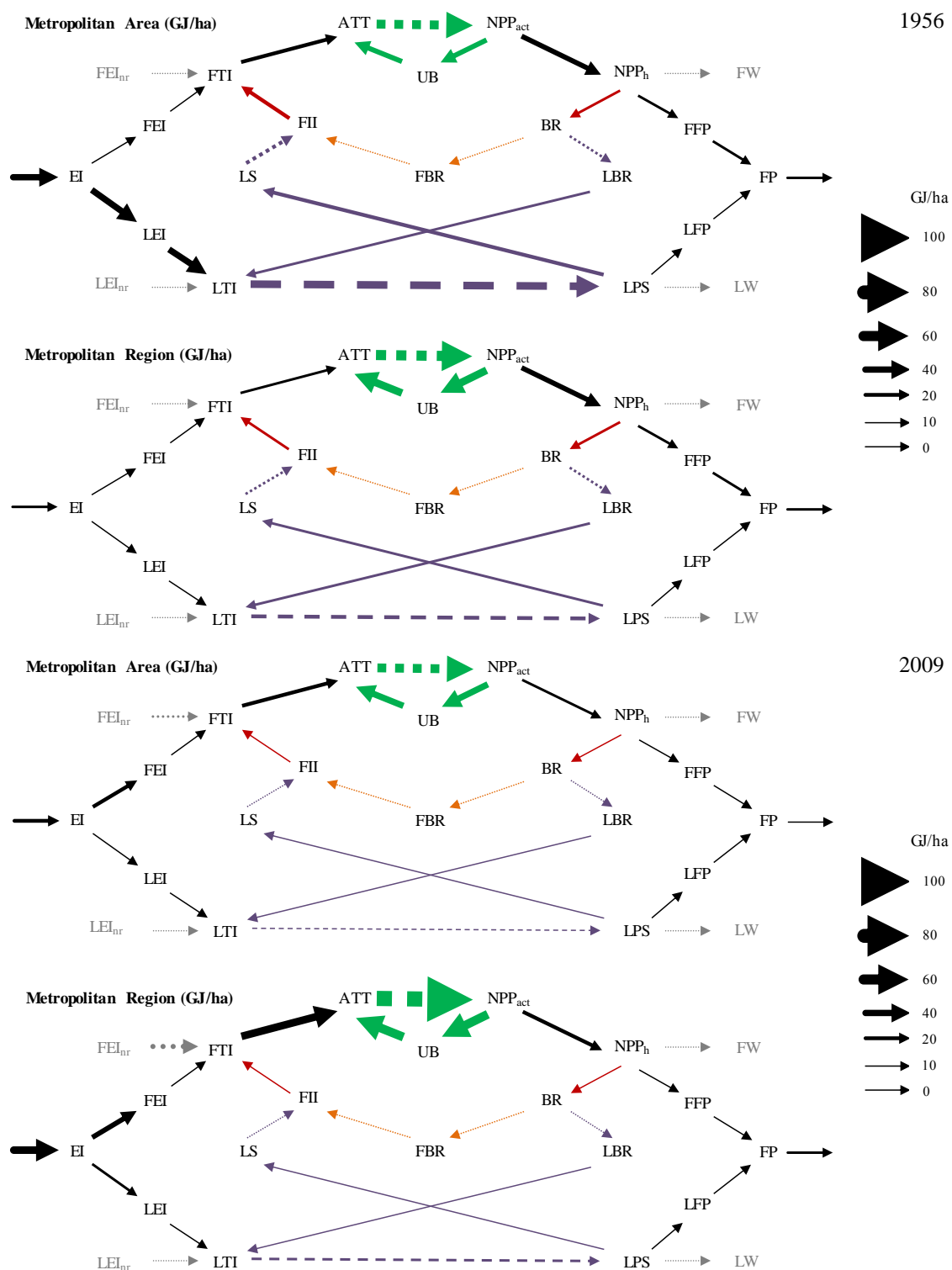


Figura 41 Canvi en els cicles metabòlics dels agro-ecosistemes segons ELIA (*Energy – Landscape Integrated Analysis*) a les comarques: Alt Penedès, Baix Llobregat, Barcelonès, Garraf, Maresme, Vallès Occidental i Vallès Oriental (en GJ); 1956-2009.

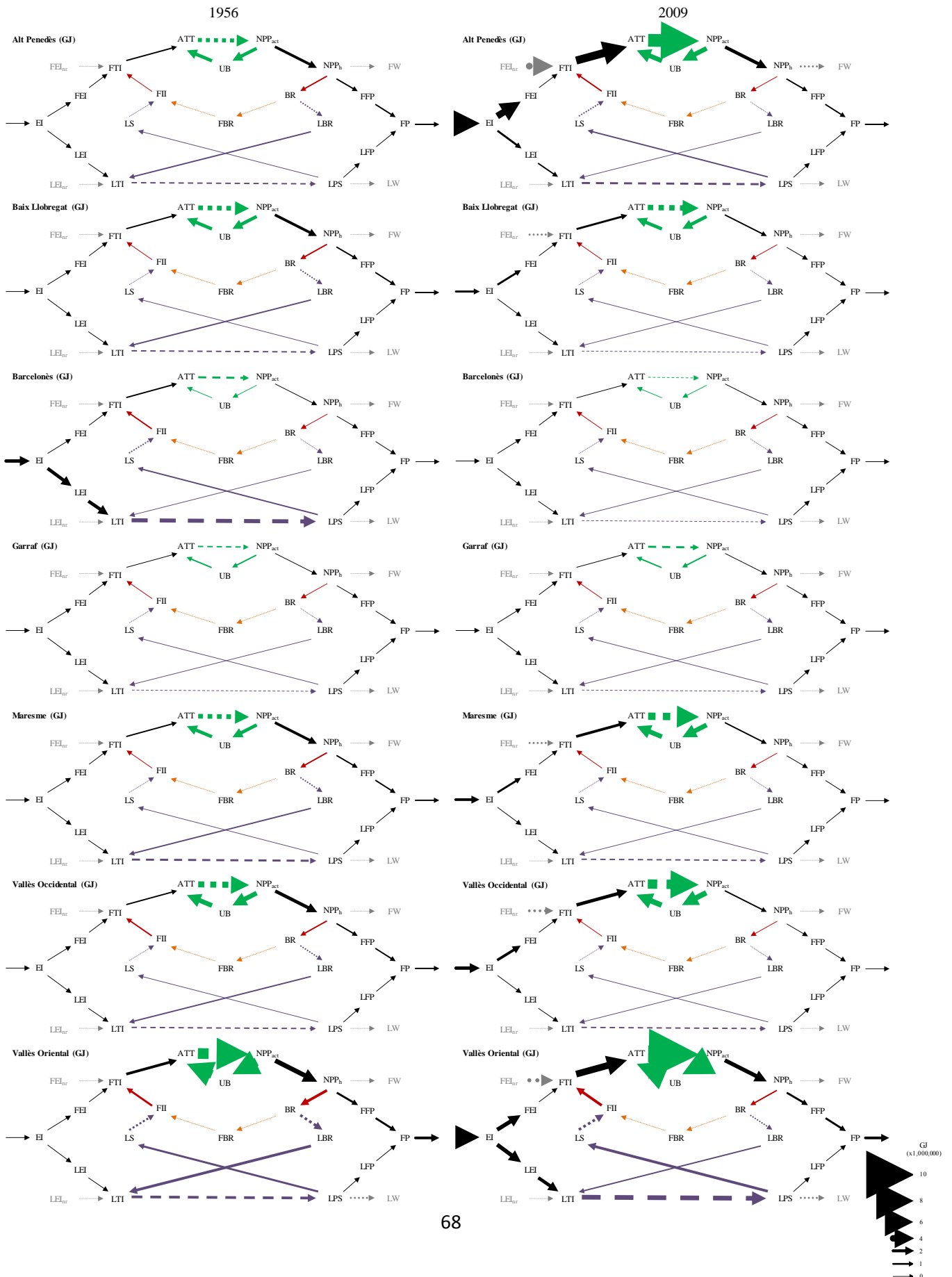


Figura 42 Models IDC (*Intermediate – Disturbance Complexity*) i ELIA (*Energy – Landscape Integrated Analysis*), aplicats a les comarques Alt Penedès, Baix Llobregat, Barcelonès, Garraf, Maresme, Vallès Occidental i Vallès Oriental, i la regió (RMB) i l'àrea metropolitana de Barcelona (AMB); 1956 i 2009

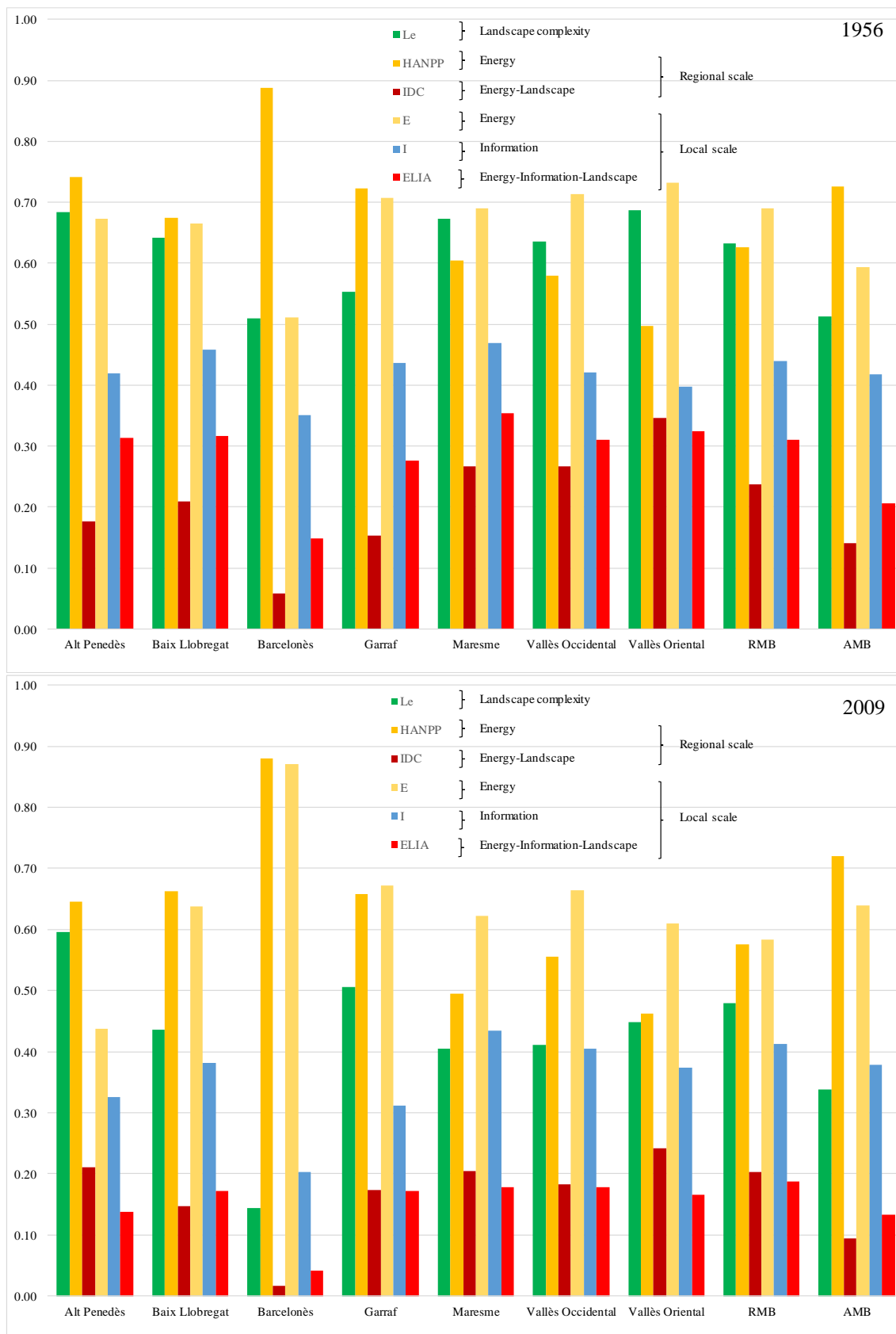


Figura 43 Mapes del model IDC (*Intermediate – Disturbance Complexity*), amb les variables Le (*Landscape Ecology metric*) i HANPP (*Human Appropriation of Net Primary Production*), a la regió de Barcelona (RMB); 1956 i 2009

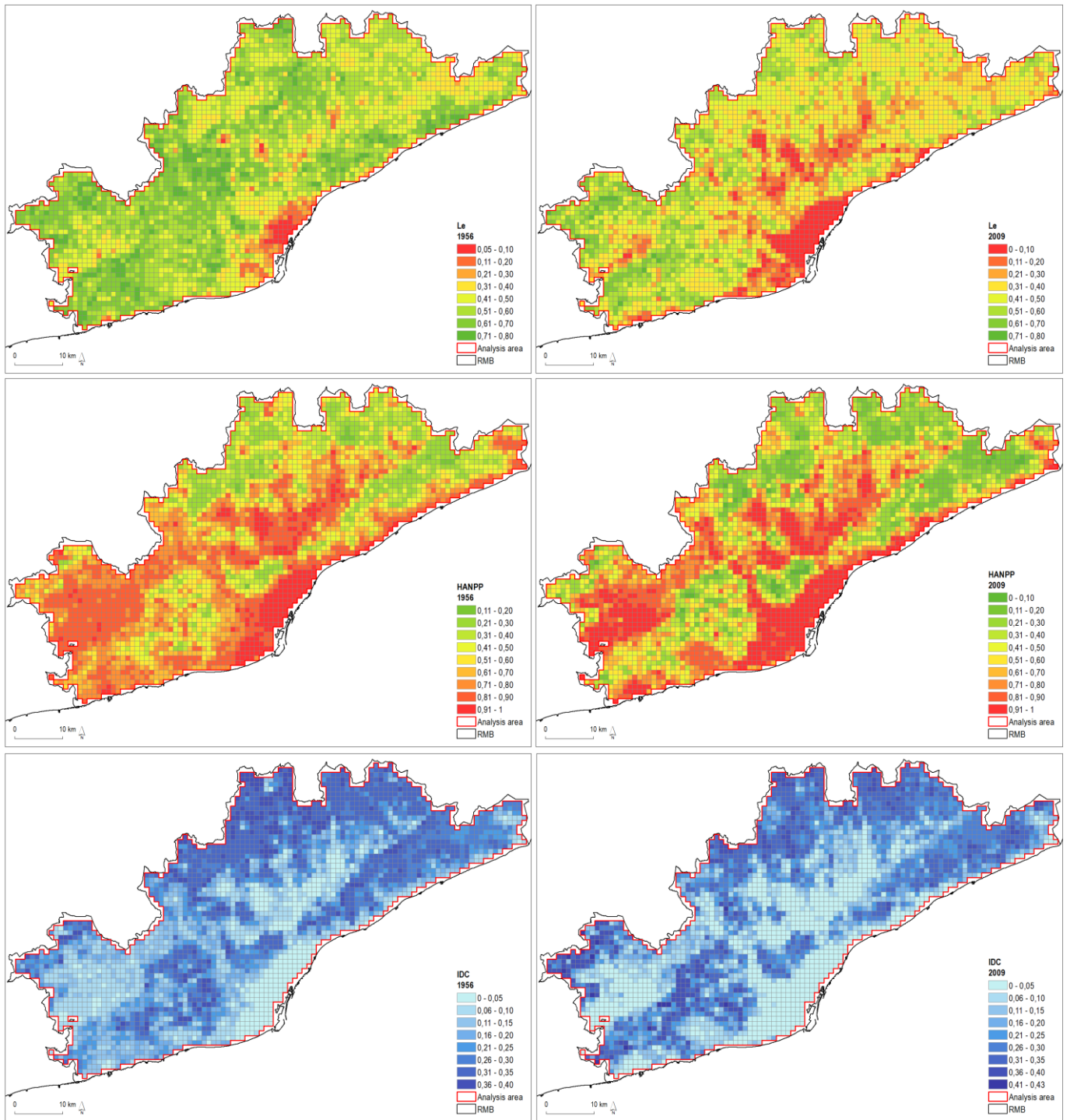
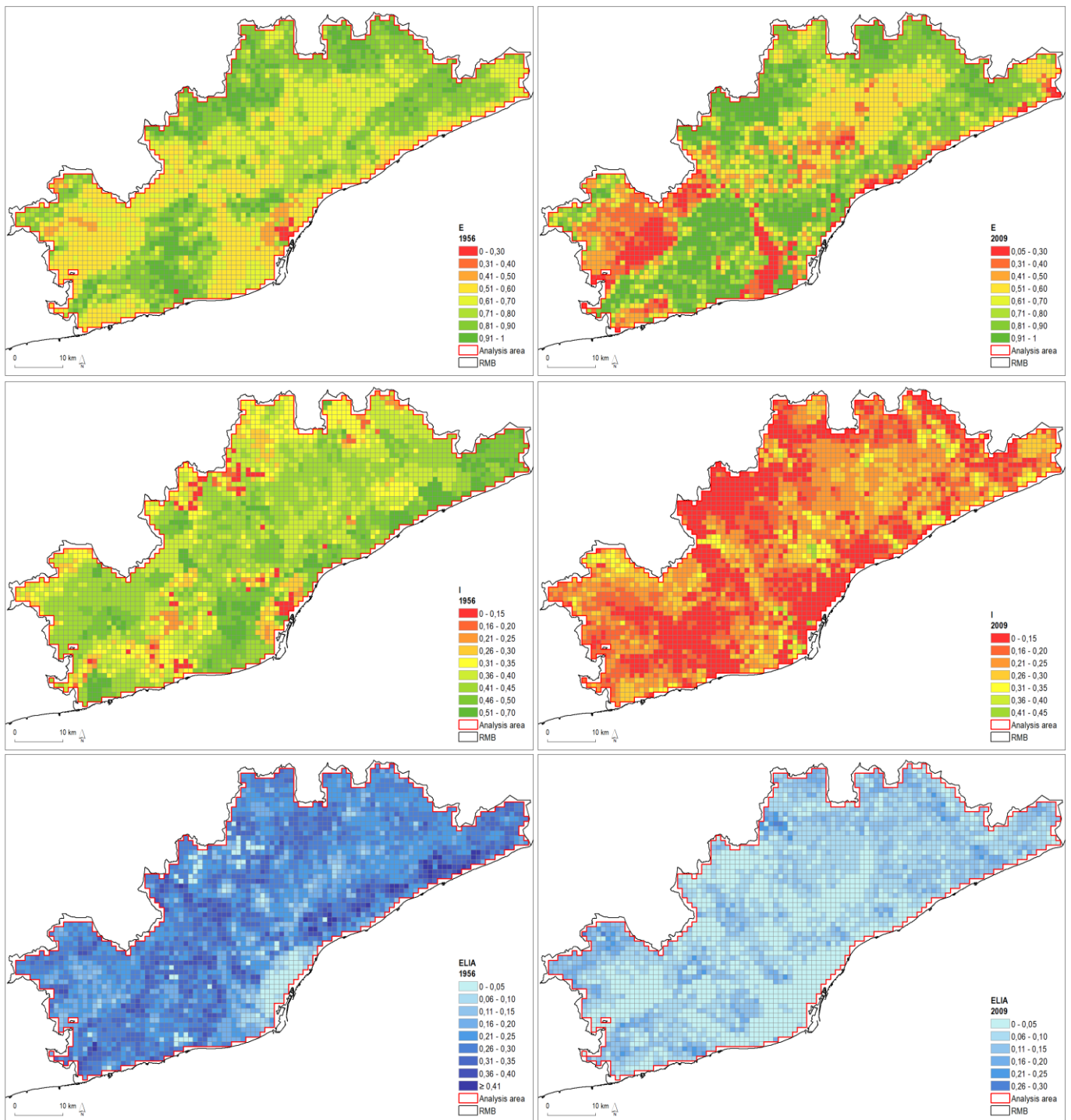


Figura 44 Mapes del model ELIA (*Energy – Landscape Integrated Analysis*), amb les variables E (*Energy Storage*) i I (*Energy Information*), a la regió de Barcelona (RMB); 1956 i 2009



#### 4.4.3. Relació entre metabolisme, territori i biodiversitat

Per a posar a prova els models energia-territori com a predictors de la biodiversitat, s'utilitzen variables predictores d'energia i territori (Taula 10) i dades empíriques de biodiversitat procedents de transectes d'ocells (Figura 38) i papallones (Figura 39) a la província (model IDC) i la regió metropolitana de Barcelona (model ELIA).

Una *Linear Regression Analysis* –LRA (Taula 11) mostra quines variables d'energia i territori presenten relació estadística amb el número d'observacions i la riquesa d'espècies de papallones a l'àmbit d'estudi. Els resultats complementen els obtinguts en anàlisis prèvies menys precises (apartat 3.3), relatives a la relació entre IDC i biodiversitat de diferents taxons a nivell de Catalunya (Figura 20 i Figura 21).

A la província de Barcelona (Taula 11), IDC i *Edge Density* (ecotonia entre usos del sòl) es relacionen positivament amb observacions de papallones; i IDC i *Polygon Density* (número de tesselles) amb riquesa d'espècies. Per tant, la pertorbació intermèdia i la complexitat del paisatge afavoreixen la diversitat i abundància de papallones.

A la regió de Barcelona (Taula 11), ELIA es relaciona positivament amb observacions de papallones; i *Shannon* i *Ecological Connectivity* (paisatges heterogenis i ben connectats) i I (redistribució de biomassa) amb riquesa d'espècies; mentre que *Grassland* (pastures) i FEInr (inputs externs no renovables –fertilitzants, pesticides) ho fan negativament. Per tant, ELIA ens permet aprofundir en les relacions metabolisme-territori-biodiversitat.

Altres *Linear Regression Analysis* –LRA, mostren quines variables d'energia i territori tenen relació estadística amb el número d'observacions i la riquesa d'espècies d'ocells nidificants (Taula 12) i hivernants (Taula 13). El cas dels ocells és més complicat perquè tenen un comportament que, degut a la seva mobilitat, els allunya al d'altres taxons –com ara plantes o mamífers (Figura 21). Els resultats confirmen les anàlisis anteriors (apartat 3.3). No obstant, s'ha volgut trobar una explicació al seu comportament diferenciat.

A la província de Barcelona, *Cropland* (conreus) i *Grassland* (pastures) afecten positivament les observacions d'ocells nidificants (Taula 12), mentre que *Ecological Connectivity* ho fa negativament. *Largest Path Index* (dimensió de les cobertes) es relaciona positivament i *Scrubland* (matollars) negativament amb la riquesa d'espècies nidificants. En quant als ocells hivernants (Taula 13) apareix HANPP (collita), *Cropland* (conreus herbacis) i *Grove* (conreus fruiters) com a variables que expliquen les observacions (els ocells es desplaçant a aquests usos del sòl a cercar menjar).

Finalment, a la regió de Barcelona destaca I (biomassa redistribuïda entre diferents usos del sòl –recordem que aquest índex penalitza la utilització d'inputs no renovables, com ara pesticides i fertilitzants sintètics) com a variable clau que explica tant les observacions com la riquesa d'espècies d'ocells hivernants (Taula 12) i nidificants (Taula 13).

Els models energia-territori en el període 1956-2009 es comporten com a bons predictors de la biodiversitat de papallones a escala regional i local. En el cas dels ocells, la redistribució de biomassa en el sistema és fonamental.

**Taula 11** *Linear Regression Analysis* tenint en compte les variables predictores d'energia i territori (**Taula 10**) i les variables dependents de biodiversitat (observacions i espècies de papallones), aplicant IDC (*Intermediate Disturbance – Complexity*) a la província, i ELIA (*Energy – Landscape Integrated Analysis*) a la regió de Barcelona.

Total Butterflies – Observations (Province)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	18,724.647	0.607	
IDC	221,202.465	2.730	1.201
Edge Density	97.207	1.938	1.201
Statistics	Corr. R <sup>2</sup>	F	Sig
	0.160	4.132	,026(b)
a) Dependent variable: TB-OB b) Predictor variables: (constant), IDC, Edge Density Only significant variables are represented			
Total Butterflies – Species Richness (Province)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	23.778	2.754	
IDC	102.183	3.830	1.066
Polygon Density	0.078	1.658	1.066
Statistics	Corr. R <sup>2</sup>	F	Sig
	0.286	7.596	,002(b)
a) Dependent variable: TB-SR b) Predictor variables: (constant), IDC, Polygon Density Only significant variables are represented			
Total Butterflies – Observations (Region)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	41,293.408	2.109	
ELIA	527,216.781	2.824	1.000
Statistics	R <sup>2</sup>	F	Sig
	0.266	7.978	,010(b)
a) Dependent variable: TB-OB b) Predictor variables: (constant), ELIA Only significant variables are represented			
Total Butterflies – Species Richness (Region)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	7.623	0.561	
Ecological Connectivity	4.032	2.405	1.386
FEInr	-0.307	-4.062	1.553
I	92.206	2.758	1.314
Grassland	-189.150	-3.022	1.758
Shannon	48.194	2.493	2.003
Statistics	Corr. R <sup>2</sup>	F	Sig
	0.521	6.005	,002(b)
a) Dependent variable: TB-SR b) Predictor variables: (constant), Ecological Connectivity, FEInr, I, Grassland, Shannon Only significant variables are represented			



**Taula 12** *Linear Regression Analysis* tenint en compte les variables predictores d'energia i territori (Taula 10) i les variables dependents de biodiversitat (observacions i espècies d'ocells nidificants), aplicant IDC (*Intermediate Disturbance – Complexity*) a la província, i ELIA (*Energy – Landscape Integrated Analysis*) a la regió de Barcelona.

Total Breeding Birds – Observations (Province)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	502.910	10.661	
Ecological Connectivity	-56.406	-6.753	1.009
Cropland	166.904	1.863	1.075
Grassland	779.270	1.735	1.067
	Corr. R <sup>2</sup>	F	Sig
Statistics	0.361	19.070	,000(b)
a) Dependent variable: TBB-OB			
b) Predictor variables: (constant), Ecological Connectivity, Cropland, Grassland			
Only significant variables are represented			
Total Breeding Birds – Species Richness (Province)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	113.412	16.681	
Largest Path Index	0.000	-4.700	1.116
Scrubland	-39.183	-3.597	1.116
	Corr. R <sup>2</sup>	F	Sig
Statistics	0.206	13.459	,000(b)
a) Dependent variable: TBB-SR			
b) Predictor variables: (constant), Largest Path Index, Scrubland			
Only significant variables are represented			
Total Breeding Birds – Observations (Region)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	526.167	7.576	
Grassland	2,134.082	3.029	1.262
E	-316.791	-4.063	1.142
Le	-446.136	-3.676	1.231
I	523.249	2.125	1.353
	Corr. R <sup>2</sup>	F	Sig
Statistics	0.500	17.273	,000(b)
a) Dependent variable: TBB-OB			
b) Predictor variables: (constant), Grassland, E, Le, I			
Only significant variables are represented			
Total Breeding Birds – Species Richness (Region)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	70.962	9.144	
BEROI	-15.720	-2.060	1.090
I	69.576	2.440	1.217
Grassland	158.545	1.773	1.291
	Corr. R <sup>2</sup>	F	Sig
Statistics	0.248	8.257	,000(b)
a) Dependent variable: TBB-SR			
b) Predictor variables: (constant), BEROI, I, Grassland			
Only significant variables are represented			

Taula 13 *Linear Regression Analysis* tenint en compte les variables predictores d'energia i territori (Taula 10) i les variables dependents de biodiversitat (observacions i espècies d'ocells hivernants), aplicant IDC (*Intermediate Disturbance – Complexity*) a la província, i ELIA (*Energy – Landscape Integrated Analysis*) a la regió de Barcelona.

Total Wintering Birds – Observations (Province)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	38.546	0.520	
HANPP	566.719	4.719	1.141
Cropland	440.080	2.593	1.258
Scrubland	-363.316	-2.183	1.169
Grove	1,583.181	2.013	1.018
	Corr. R <sup>2</sup>	F	Sig
Statistics	0.380	13.853	,000(b)
a) Dependent variable: TWB-OB			
b) Predictor variables: (constant), Ecological Connectivity, Cropland, Grassland			
Only significative variables are represented			
Total Wintering Birds – Species Richness (Province)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	75.439	11.161	
Ecological Connectivity	-11.614	-4.839	4.311
Open Space (%)	40.571	2.385	4.496
Shannon	50.302	3.304	1.568
Scrubland	-21.032	-1.640	1.163
	Corr. R <sup>2</sup>	F	Sig
Statistics	0.301	10.052	,000(b)
a) Dependent variable: TWB-SR			
b) Predictor variables: (constant), Ecological Connectivity, Open Space, Shannon, Scrubland			
Only significative variables are represented			
Total Wintering Birds – Observations (Region)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	5.981	14.292	
Grassland	7.808	2.568	1.267
E	-1.694	-4.264	1.235
I	3.057	2.725	1.212
	Corr. R <sup>2</sup>	F	Sig
Statistics	0.543	22.015	,000(b)
a) Dependent variable: TWB-OB			
b) Predictor variables: (constant), Grassland, E, I			
Only significative variables are represented			
Total Wintering Birds – Species Richness (Region)			
	Coef.	t	VIF
(constant)	80.723	5.558	
BEROI	-24.532	-2.213	1.509
I	114.948	2.745	1.449
Ecological Connectivity	-3.950	-2.607	1.058
	Corr. R <sup>2</sup>	F	Sig
Statistics	0.401	12.811	,000(b)
a) Dependent variable: TWB-SR			
b) Predictor variables: (constant), BEROI, I, Ecological Connectivity			
Only significative variables are represented			

## 5. Conclusions principals

Podem ressaltar l'impacte conceptual del model energia-territori en discussions actuals sobre el paper de l'agricultura en el planejament de les metròpolis, a nivell internacional:

- i) En el dilema entre producció d'aliments vs conservació de la biodiversitat (*global food – biodiversity dilemma*), amb implicacions en la regulació de l'agricultura periurbana;
- ii) En la hipòtesi de l'explotació dels espais oberts (*intermediate disturbance hypothesis*), amb implicacions en la gestió dels agro-ecosistemes;
- iii) En el debat entre espais naturals vs espais humanitzats (*land-sharing – land-sparing debate*), amb implicacions en la biologia de la conservació;
- iv) En el nou paradigma de l'economia circular (*circular economic assessment of agriculture*), amb implicacions en un progrés metropolità més ecològic;
- v) En les infraestructures verdes (*green infrastructures*), amb implicacions en estructurar les xarxes de ciutats i el tractament del territori com a sistema;
- vi) En l'anomenat cost territorial de la sostenibilitat –en termes d'energia i usos del sòl (*sustainability territorial cost*), amb implicacions en el planejament urbanístic i territorial.

Les principals contribucions metodològiques del model energia-territori són:

- i) La utilització de “xarxes ecològiques” per avaluar els fluxos d'energia que tenen lloc en la matriu territorial;
- ii) La “territorialització” d'aquests fluxos d'energia, per a poder realitzar anàlisis estadístics i models matemàtics;
- iii) El desenvolupament de tres anàlisis estretament relacionades: “anàlisi multi-EROI”, “anàlisi multi-escalar” i “model energia-territori –ELIA”.
- iv) El pas endavant en l'estudi de la “eficiència territorial”, al combinar mètriques del paisatge amb fluxos sòcio-metabòlics.
- v) El potencial de poder avaluar: qualitat ecològica dels paisatges i biodiversitat, serveis ecosistèmics i afectacions en el canvi global (Figura 1).

Els criteris i mètodes desenvolupats en el model energia-territori s'han aplicat a la regió metropolitana de Barcelona, on destacaríem els següents resultats:

- i) Els resultats són especialment rellevants des de la perspectiva de l'economia circular: s'ha de tornar a sistemes metropolitans centrats en la recirculació de la biomassa –incorporant-hi noves tecnologies- més que no pas a explotacions agrícoles basades en inputs externs d'origen no orgànic (Figura 37).
- ii) La combinació de l'agricultura ecològica (encara molt poc desenvolupada a la metròpoli i, per tant, amb un alt potencial) i l'agricultura intensiva en treball, aporta solucions viables: en el primer cas, control de plagues amb mètodes biològics / mecànics i fertilització amb fems / adobs orgànics; en el segon cas, la maquinària dona pas a un treball més eficient, genera beneficis socials i llocs de treball, aporta valor afegit al producte final i un millor accés a la terra.

- iii) L'expansió urbana en detriment de la superfície agrícola ha produït un descens de la terra conreada per habitant. Això implica una major dependència de productes agrícoles d'importació i, per tant, una menor sobirania alimentària.
- iv) Cal, per tant, fomentar l'ús eficient de l'agricultura metropolitana, bé amb la recuperació de terres de conreu, bé amb una millor explotació de les terres no conreades, sobretot boscos i matollars, que a més de garantir l'eficiència agrícola també ajuden a la conservació del paisatge.
- v) En aquesta línia, una bona gestió del bosc com a font de biomassa, a més de permetre la seva conservació, seria també una oportunitat per fomentar l'ús d'energia renovable.
- vi) S'ha comprovat un preocupant descens en poblacions i espècies de diversos taxons. Aquesta pèrdua de biodiversitat s'ha associat a un descens en l'ús integrat del territori (complexitat del paisatge –heterogeneïtat i connectivitat, mantinguda gràcies al seu aprofitament sostenible –biomassa reinvertida i redistribuïda en la matriu territorial).
- vii) Per mantenir la qualitat ecològica del paisatge i els serveis ecosistèmics que aporta a la societat, cal posar en valor l'agricultura periurbana com una infraestructura verda vinculada al sistema metropolità (Figura 16).

Es destaquen cinc idees clau que des de l'ecologia es poden aportar al planejament del territori metropolità de Barcelona:

- i) Protegir els sòls agraris i forestals de la conversió a altres usos (per exemple, Pla Metropolità d'Espais d'Interès Agrari), amb noves figures de planejament (com ara el Parc Agrari del Baix Llobregat) que permetin la heterogeneïtat i connectivitat del paisatge (biodiversitat, serveis ecosistèmics);
- ii) Afavorir la transició agroecològica, mitjançant formes d'agricultura i horticultura més sostenibles (per exemple, circuits curts de producció-consum que millorin el valor afegit pels agricultors, i la seva seguretat per fidelització dels consumidors –aliments propers, salut, millora del paisatge);
- iii) Evitar l'abandonament de zones de bosc i antigues pastures en procés de reforestació espontània (per exemple, acords de custòdia del territori amb beneficis fiscals o subvencions públiques que compensin les externalitats ambientals positives d'activitats encara poc profitoses);
- iv) Introduir polítiques d'incentivació controlada de la silvicultura sostenible i la ramaderia ecològica extensiva (també com a gestió ambiental activa als espais naturals protegits);
- v) Canviar i simplificar figures del planejament urbanístic per donar cabuda explícita a aquesta infraestructura verda integrada en el territori (per exemple, vinculada a la mobilitat no motoritzada), protegir-la de l'especulació del sòl, i a la vegada evitar que el propi planejament o figures de "protecció" impedeixi la innovació i canvi cap a paisatges més complexos i integrats (per exemple, la relació rural-urbana).

Finalment, de cara a la planificació del territori, s'exposen un parell de preguntes:

- i) Quin és el cost de mantenir els paisatges bio-culturals i els serveis ecosistèmics que ofereixen?
  - L'agricultura tradicional i l'agricultura ecològica, gestionen el paisatge de manera que permet mantenir els serveis ecosistèmics;
  - Però aquestes funcions socioambientals tenen un cost territorial de la sostenibilitat que suporten els agricultors, i podem calcular.
- ii) Com podem gestionar els paisatges bio-culturals i els serveis que proporcionen a la societat?
  - El desenvolupament rural i la planificació territorial han de considerar el territori com a sistema, en comptes d'aplicar mesures parcials;
  - També cal reconèixer als agricultors com a gestors del paisatge i proveïdors de serveis públics;
  - De forma que es podria abordar el cost territorial de la sostenibilitat mitjançant ajudes a l'agricultura ecològica a canvi d'uns serveis mesurables (per exemple, contracte agrícola a partir d'una ecotaxa)<sup>77</sup>.

Propera recerca vincularà el model energia-territori amb el canvi global (per exemple, emissions d'efecte hivernacle –canvi climàtic) i els serveis ecosistèmics (per exemple, de regulació –segrest de carboni- i de provisió –producció d'aliments de proximitat) amb l'objecte de caracteritzar el sistema socioecològic metropolitana (Figura 1). Es proposa:

- i) El desenvolupament d'un model socioecològic amb capacitat de simular escenaris –cost territorial- per l'avaluació estratègica del planejament;
- ii) Una anàlisi metabòlic-territorial de diverses tipologies d'explotació agrícola (ecològiques vs convencionals) a l'àmbit metropolitana;
- iii) La creació d'un laboratori metropolitana d'ecologia i territori de Barcelona amb la finalitat de:
  - Sistematitzar les bases de dades existents i completar informació no disponible (metabòliques, biodiversitat, etc.);
  - Fer un seguiment dels indicadors més significatius a l'àmbit d'estudi (dinàmiques territorials, avaluació de polítiques, etc.);
  - Impulsar estudis d'interès científic i aplicat (d'acord amb un consell científic i un consell de l'administració, respectivament).

---

<sup>77</sup> L'aplicació del projecte *Sustainable Farm Systems* –SFS- a Mallorca, i la seva exposició davant el Govern Balear (juny 2016), ha impulsat recentment l'aprovació d'ajudes per mantenir la qualitat del paisatge agrari a partir d'una ecotaxa (Butlletí Oficial de les Illes Balears N.147 de 2 de desembre de 2017: “Resolució del president del Fons de Garantia Agrària i Pesquera de les Illes Balears (FOGAIBA) per la qual es convoquen, per a l'exercici 2017, ajudes de minimis per al manteniment del paisatge agrari de les Illes Balears”). Principals treballs científics que han impulsat aquesta iniciativa:

Marull, J.; Tello, E.; Fullana, N.; Murray, I.; Jover, G.; Font, C.; Coll, F.; Domene, E.; Decoli, T.; Leoni, V. 2015. Long-term socio-ecological transition at different spatial scales: Exploring the intermediate disturbance hypothesis in cultural landscapes (Mallorca, 1856-2012). *Biodiversity and Conservation* 24 (13), 3217-3251.

Marull, J.; Font, C.; Tello, E.; Fullana, N.; Domene, E.; Pons, M. 2016. Towards an Energy-Landscape Integrated Analysis? Exploring the links between socio-metabolic disturbance and landscape ecology performance (Mallorca, Spain, 1956-2011). *Landscape Ecology* 31, 317-336.

## Índex de taules

Taula 1 Indicadors per avaluar l'estat ecològic de la matriu territorial. Selecció de mètriques de canvi de cobertes del sòl, estructura i funcionalitat del paisatge.....	20
Taula 2 Canvi en les cobertes del sol a la província de Barcelona (1956-1993-2009).....	40
Taula 3 Canvi en les mètriques del paisatge aplicades a la província de Barcelona (cel·les 10x10 km <sup>2</sup> ; 1956, 1993, 2009).....	40
Taula 4 Negative Binomial Regression Analysis per la variable biodiversitat total, considerant l'increment ( $\Delta$ ) de HANPP i de les mètriques del paisatge (H', LPI, ED, EMS, PD, ECI) a la província de Barcelona (cel·les UTM 10 km); en el període 1956–2009.....	41
Taula 5 Evolució dels EROIs econòmics <sup>1</sup> i els EROIs agro-ecològics <sup>2</sup> a l'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB), i la regió de Barcelona (RMB); 1956 – 2009.....	49
Taula 6 Composició dels espais oberts (a) i la cabanya ramadera (b) a l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona, en el període 1956–2009.....	54
Taula 7 Producte final (Final Product –FP) total (GJ), per unitat de superfície (GJ/ha) i per residu (GJ/ha) <sup>1</sup> , en relació al tipus de conreu i la cabanya ramadera, a l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona, en el període 1956–2009.....	59
Taula 8 Input extern (External Input –EI), total (GJ), per unitat de superfície (GJ/ha) i per ramaderia (GJ/unitats ramaderes) <sup>1</sup> , en relació al tipus de conreu i la cabanya ramadera, a l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona, en el període 1956–2009. ....	59
Taula 9 Recirculació de biomassa (Biomass reused –BR), total (GJ), per unitat de superfície (GJ/ha) i per ramaderia (GJ/unitats ramaderes) <sup>1</sup> , en relació al tipus de conreu i els fluxos entre la cabanya ramadera i els conreus, a l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona, en el període 1956–2009. ....	60
Taula 10 Base de dades amb variables d'energia, territori i biodiversitat, emprada per aplicar IDC (Intermediate Disturbance – Complexity) i ELIA (Energy – Landscape Integrated Analysis) a la província i la regió metropolitana de Barcelona, respectivament. ....	63
Taula 11 Linear Regression Analysis tenint en compte les variables predictores d'energia i territori (Taula 10) i les variables dependents de biodiversitat (observacions i espècies de papallones), aplicant IDC (Intermediate Disturbance – Complexity) a la província, i ELIA (Energy – Landscape Integrated Analysis) a la regió de Barcelona. ....	73
Taula 12 Linear Regression Analysis tenint en compte les variables predictores d'energia i territori (Taula 10) i les variables dependents de biodiversitat (observacions i espècies d'ocells nidificants), aplicant IDC (Intermediate Disturbance – Complexity) a la província, i ELIA (Energy – Landscape Integrated Analysis) a la regió de Barcelona. ....	74
Taula 13 Linear Regression Analysis tenint en compte les variables predictores d'energia i territori (Taula 10) i les variables dependents de biodiversitat (observacions i espècies d'ocells hivernants), aplicant IDC (Intermediate Disturbance – Complexity) a la província, i ELIA (Energy – Landscape Integrated Analysis) a la regió de Barcelona. ....	75

## Índex de figures

Figura 1 Esquema conceptual de la contribució dels espais oberts en el sistema socioecològic metropolità. Inclou metabolisme social –energia i materials (A), conservació del territori –recursos i biodiversitat (B), qualitat dels ecosistemes –patrons i processos (C), canvi global –usos del sòl i clima (D) i serveis ecosistèmics –regulació i provisió (E). Es destaca la importància de la infraestructura verda per estructurar funcionalment la xarxa de ciutats. Aquest treball contribueix principalment en A, B i C.	3
Figura 2 A partir d'un esquema conceptual de la vida, es presenta un model de la relació entre el metabolisme social i la matriu territorial (a). La vida tracta d'escapar de la tendència universal a l'equilibri termodinàmic, incrementant la seva complexitat interna i exportant entropia a l'entorn (b). Un ésser viu consisteix en una estructura espai-temporal dinàmica amb múltiples cicles metabòlics relacionats (c). El model termodinàmic d'organisme presenta fortes similituds amb els agro-ecosistemes.	6
Figura 3 Esquema de l'estructura i funcionalitat de la matriu territorial en el context dels paisatges culturals.	10
Figura 4 Esquema de la hipòtesi de la Pertorbació Intermèdia – Complexitat, en el context d'un paisatge bio-cultural a la Mediterrània.	12
Figura 5 Esquema de les dues metodologies proposades per avaluar la relació entre metabolisme social, canvis en els usos del sòl i propietats ecològiques del paisatge.	15
Figura 6 Esquema conceptual del balanç (EROI; Energy Return of Investment) entre l'energia que inverteix la societat en la matriu territorial (EI; External Inputs) i el retorn a la mateixa societat (FP; Final Produce) com a serveis ecosistèmics de provisió. Es destaca la biomassa reutilitzada (BR; Biomass Reused) en una economia més circular.	17
Figura 7 Relació entre l'eficiència energètica mesurada com el retorn a la societat de l'energia invertida (FEROI; Final EROI) i els seus dos components: la relació entre l'energia externa i el producte final (EFEROI; External Final EROI), i l'eficiència en que la biomassa reutilitzada es transforma en producte final (IFEROI; Internal Final EROI).	17
Figura 8 Model teòric simplificat de la relació entre complexitat del paisatge ( $H'$ ; Shannon-Wiener Index) i pertorbació antròpica (HANPP; Human Appropriation of Net Primary Production) per a dos i tres cobertes del sòl.	22
Figura 9 Model teòric de Pertorbació Intermèdia – Complexitat (IDC; Intermediate Disturbance – Complexity). S'inclou l'anomenat dilema entre producció d'aliments i conservació de la biodiversitat.	22
Figura 10 Esquema conceptual dels fluxos d'energia en un agro-ecosistema, des de la perspectiva de l'ecologia del paisatge.	24
Figura 11 Relació entre l'energia reinvertida (E; Energy Storage) i redistribuïda (I; Energy Information) dins la matriu territorial.	24
Figura 12 Esquema teòric de la relació entre l'energia reinvertida (E; Energy Storage) i l'energia redistribuïda a la matriu territorial, segons la Teoria de la Informació (I; Energy Information) i segons l'agroecologia ( $I^*$ ; Agro-ecological Information). En color es mostren on es donen els valors més alts en el model Anàlisi Integrada Energia – Territori (ELIA; Energy – Landscape Integrated Analysis).	26
Figura 13 Esquema tridimensional de la relació entre l'energia reinvertida (E; Energy Storage), l'energia redistribuïda (I; Energy Information) i l'energia impresa (L; Landscape Complexity) en la matriu territorial.	26
Figura 14 Distribució d'espècies d'orquídies en cel·les UTM 1x1 km <sup>2</sup> en el municipi de Figaró-Montmany. Influència de cobertes del sòl, indicadors del paisatge i topografia.	28
Figura 15 Àmbit d'Olzinelles (municipi de Sant Celoni). Riquesa d'espècies i abundància de papallones en els transectes de Can Riera (1994-2005) i Can Valls (2006-2012).	29



Figura 16 Síntesi d'un estudi de base per a l'ordenació dels espais oberts a l'àrea metropolitana de Barcelona, elaborat a partir del model de mosaic territorial. ....	31
Figura 17 Incrementos de connectivitat ecològica (a dalt), i nombre (al mig) i superfície total (a baix) d'àrees ecològiques funcionals (AEF), respecte l'escenari tendencial (plans urbanístics) a la regió metropolitana de Barcelona, per diversos escenaris progressius de la proposta d'ordenació dels espais oberts (E1 a E6; Figura 16). Es mostren increments bruts (esquerra) i ponderats per superfície protegida a cada escenari (dreta). Els càlculs es presenten per AEF totals (vermell), forestals (verd fosc) i agrícoles (verd clar). ....	31
Figura 18 Cobertes del sòl i mètriques del paisatge (H', ECI, Le, HANPP, IDC) per unitats d'anàlisi UTM 10 km a Catalunya (dades de 2009).....	33
Figura 19 Riquesa d'espècies total i per diferents taxons (plantes vasculars, amfibis, rèptils, ocells i mamífers) per unitats d'anàlisi UTM 10 km a Catalunya (dades de 2009) .....	34
Figura 20 Negative Binomial Regression Analysis per les variables: plantes vasculars, amfibis, rèptils, ocells, mamífers i biodiversitat total; considerant el model IDC i les cobertes del sol de Catalunya (cel·les UTM 10 km). ....	35
Figura 21 Exploratory Factor Analysis per les variables: biodiversitat total i cobertes del sol de Catalunya (cel·les UTM 10 km; 2009). ....	36
Figura 22 Structural Equation Model per explorar els efectes de l'agricultura en la biodiversitat total a Catalunya (cel·les UTM 10 km; 2009), considerant les variables: HANPP, cobertes del sol (Cm), mètriques del paisatge (Cn), i un model digital d'elevacions com a control (MDE). ....	37
Figura 23 Canvi en les cobertes del sol i la funcionalitat ecològica del territori (ECI; Ecological Connectivity Index) a la província de Barcelona (1956-1993-2009). Es representen les cel·les de 10x10 km <sup>2</sup> emprades en les anàlisis estadístiques.....	39
Figura 24 Aplicació del graf de cicles metabòlics en un cas d'estudi al Vallès, en dos temps: agricultura orgànica –1860; i agricultura industrial –2000. El gruix de les fletxes correspon al flux d'energia (GJ/ha). Es mostra la relació amb les cobertes del sòl (mosaics del paisatge –1860; creixement urbà, ramaderia intensiva i transició forestal –2000).....	43
Figura 25 Esquema teòric (a dalt) de la relació entre l'energia reinvertida (E; Energy Storage), l'energia redistribuïda (I; Energy Information) i l'energia impresa en el paisatge (L; Landscape Complexity), i aplicació (a baix) al cas d'estudi del Vallès (1860 i 2000). ....	43
Figura 26 Aplicació de Final EROI –FEROI (producte final –FP / inputs totals consumits –TIC) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009.....	46
Figura 27 Aplicació de External Final EROI –EEROI (producte final –FP / inputs externs –EI) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009.....	46
Figura 28 Aplicació de Internal Final EROI –IEROI (producte final –FP / biomassa reutilitzada –BR) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009.....	47
Figura 29 Aplicació de Net Primary Production EROI –NPPEROI (producció primària neta actual –NPPact / inputs totals consumits –TIC + biomassa no collida –UB) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009. ....	47
Figura 30 Aplicació de Agro-ecological Final EROI –AFEROI (producte final –FP / inputs totals consumits –TIC + biomassa no collida –UB) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009.....	48
Figura 31 Aplicació de Biodiversity EROI –BEROI (biomassa no collida –UB / inputs totals consumits –TIC + biomassa no collida –UB) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 i 2009.....	48
Figura 32 Percentatge del producte ramader respecte el total en el càlcul de Final EROI –FEROI (producte final –FP / inputs totals consumits –TIC) als municipis i el total de l'Àrea Metropolitana de Barcelona	

(36 municipis), i la regió de Barcelona (164 municipis) en el període entre 1956 (blau) i 2009 (vermell). .....	49
Figura 33 Evolució del percentatge de cobertes del sòl a l'àrea (AMB; a) i la regió (RMB; b) metropolitana de Barcelona, en el període 1956 (cercle intern) – 2009 (cercle extern). .....	51
Figura 34 Superfície (ha) i composició (%) dels espais oberts (a) i la cabanya ramadera (b) a l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona; 1956–2009.....	52
Figura 35 Unitats ramaderes totals / superfície de conreu (ha) als municipis i el total de l'àrea (AMB) i la regió (RMB) metropolitana de Barcelona, en el període entre 1956 (blau) i 2009 (vermell). .....	54
Figura 36 Origen de la recirculació de biomassa (GJ) cap a la cabanya ramadera a la regió metropolitana de Barcelona (RMB), en el període 1956–2009. ....	60
Figura 37 Esquema de la relació entre External Inputs (EI), Final Product (FP) i Biomass Reused (BR) –de la terra a la cabanya i de la cabanya a la terra-, així com la possible relació del metabolisme social amb la qualitat ecològica del territori, la biodiversitat que acull, els serveis ecosistèmics que ofereix a la societat i l'impacte en el canvi global. D'aquí ve l'interès de l'agricultura com infraestructura verda metropolitana (Figura 1). .....	61
Figura 38 Transectes utilitzats per obtenir dades d'ocells (buffer lineal: 500 m) a la província (151 transectes) i la regió (91 transectes) metropolitana de Barcelona. Es mostra el canvi en la riquesa d'espècies i el número d'observacions per ocells nidificants i hivernants, totals i associats a l'agricultura, en el període 2005-2015.....	64
Figura 39 Transectes utilitzats per obtenir dades de papallones (buffer circular: 750 m) a la província (56 transectes) i la regió (41 transectes) metropolitana de Barcelona. Es mostra el canvi en la riquesa d'espècies i el número d'observacions per papallones generalistes o especialistes, d'espais oberts o d'espais tancats, en el període 2005-2015. ....	65
Figura 40 Canvi en els cicles metabòlics interns dels agro-ecosistemes, segons l'esquema conceptual que segueix el model energia –territori ELIA (Energy – Landscape Integrated Analysis), a la regió i a l'àrea metropolitana de Barcelona (en GJ/ha); 1956-2009. ....	67
Figura 41 Canvi en els cicles metabòlics dels agro-ecosistemes segons ELIA (Energy – Landscape Integrated Analysis) a les comarques: Alt Penedès, Baix Llobregat, Barcelonès, Garraf, Maresme, Vallès Occidental i Vallès Oriental (en GJ); 1956-2009. ....	68
Figura 42 Models IDC (Intermediate – Disturbance Complexity) i ELIA (Energy – Landscape Integrated Analysis), aplicats a les comarques Alt Penedès, Baix Llobregat, Barcelonès, Garraf, Maresme, Vallès Occidental i Vallès Oriental, i la regió (RMB) i l'àrea metropolitana de Barcelona (AMB); 1956 i 2009 .....	69
Figura 43 Mapes del model IDC (Intermediate – Disturbance Complexity), amb les variables Le (Landscape Ecology metric) i HANPP (Human Appropriation of Net Primary Production), a la regió de Barcelona (RMB); 1956 i 2009 .....	70
Figura 44 Mapes del model ELIA (Energy – Landscape Integrated Analysis), amb les variables E (Energy Storage) i I (Energy Information), a la regió de Barcelona (RMB); 1956 i 2009 .....	71