

El potencial solar fotovoltaic dels terrats dels edificis públics de la província de Tarragona: reptes per avançar cap a la Transició Energètica i expectatives dels agents implicats

Projecte 2022/22

Conveni marc DIPTA-URV 2020-2023



Diputació Tarragona



Aquest document és fruit del Projecte 2022/22

“El potencial solar fotovoltaic dels terrats dels edificis públics de la província de Tarragona: reptes per avançar cap a la Transició Energètica i expectatives dels agents implicats”, integrat en el Conveni marc DIPTA-URV 2020-2023.

COORDINACIÓ:

Benito Zaragozí. Departament de Geografia. Universitat Rovira i Virgili

EQUIP DE TREBALL:

Òscar Saladié Borraz . Departament de Geografia. Universitat Rovira i Virgili

Lluís Salvat Garcia. Departament de Geografia. Universitat Rovira i Virgili

Sergi Saladié Gil. Departament de Geografia. Universitat Rovira i Virgili

Maria Trinitat Rovira Soto. Departament de Geografia. Universitat Rovira i Virgili

Jordi Blay Boqué. Departament de Geografia. Universitat Rovira i Virgili

DATA DE FINALITZACIÓ: DESEMBRE 2022

ÍNDEX

1	Introducció	4
1.1	Antecedents i justificació.....	6
1.2	Objectius	7
1.3	Estructura del document	8
2	Marc teòric.....	9
2.1	Factors que afecten l'adopció solar FV	9
2.2	Efectes de parells (veïnatge) com a variacions locals en la difusió FV	13
2.3	Metodologies per a l'estimació del potencial FV a cobertes.....	13
2.4	Oportunitats de recerca.....	18
3	Àmbit territorial	20
4	Metodologia.....	30
4.1	Disponibilitat de dades	32
4.2	Modelat del potencial solar fotovoltaic	33
4.3	Superfície de coberta disponible	34
4.4	Càlcul de la producció potencial d'energia	34
5	Resultats.....	36
5.1	Model de potencial tècnic calculat.....	36
5.2	Resultats quantitatius de l'enquesta enviada als ajuntaments.....	38
5.3	Resultats qualitatius de l'enquesta	40
6	Discussió i Conclusions.....	51
7	Bibliografia	56
8	Annexos.....	61
8.1	Exemples de fitxes	61

1 INTRODUCCIÓ

El Canvi Climàtic afecta a la societat en el seu conjunt i als ecosistemes del planeta, per la qual cosa existeix un interès creixent a promoure noves maneres d'afrontar els seus efectes. Entre les línies d'acció prioritàries, la descarbonització i l'adopció d'energies renovables es consideren entre les mesures més prometedores cap a la Transició Energètica. Per aconseguir aquests objectius, la directiva revisada sobre energies renovables 2018/2001/UE (Parlament Europeu, 2018) estableix que per al 2030, com a mínim, 32% de les necessitats energètiques totals de la UE haurien de cobrir-se amb energies renovables. Per exemple, el govern espanyol té la intenció d'arribar a generar 89 GW d'energies renovables per a aconseguir cap al 2030 el 50% de la generació d'electricitat a través de fonts renovables, i al 100% per a l'any 2050. Entre aquests objectius, la Llei 16/2017, d'1 d'agost, sobre el canvi climàtic en relació amb la Transició Energètica (Article 2.2.a.) assenyala que el model de Transició Energètica necessitarà ser descentralitzat i fonamentalment local. Aquest enfocament general s'especifica en l'Article 19 quan s'affirma que la Transició Energètica caldrà:

1. Promoure instal·lacions renovables desenvolupades aprofitant espais ja alterats per l'activitat humana, minimitzant l'ocupació innecessària d'altres terres.
2. Fomentar les instal·lacions renovables prioritant la proximitat de la producció d'electricitat renovable als centres de consum.
3. Adoptar mesures que afavoreixin l'autoconsum energètic a partir d'energies renovables i la participació d'actors locals en la producció i distribució d'energia renovable.

Renovable, descentralitzada, local, aprofitant espais alterats i de manera participativa. En aquest context, els sistemes fotovoltaics (FV) juguen un paper important en l'assoliment de la Transició Energètica, i el potencial en àrees urbanes com les ciutats pot ser significatiu (Vargas-Salgado et al., 2022). No obstant això, malgrat els esforços del govern espanyol per evitar una bombolla especulativa en la Transició Energètica, ja hi ha autoritzacions d'accés a la xarxa per a projectes amb 121 GW que seran afegits als 36 GW d'energies renovables ja instal·lades, gairebé duplicant els objectius del National Integrated Energy and Climate Plan 2021-2030 (PNIEC). Els nous projectes afectaran centenars de milers d'hectàrees, i no hi ha

manera de compensar la gran quantitat de terres agrícoles i forestals valioses que es podrien perdre. De fet, nombrosos projectes d'energies renovables estan planejats en terres marginals de baix cost amb un alt valor ecològic i cultural (Serrano et al., 2020).

L'energia FV requereix grans quantitats de terra i en la seva majoria xocarà amb l'aprovisionament, la regulació de serveis naturals i culturals del paisatge (Kienast et al., 2017). Obane et al. (2020) expliquen que algunes centrals de producció energètica tenen un efecte negatiu en el medi ambient local i en el risc creixent per la fauna. També s'ha considerat que les analisis d'ubicació i assignació per a les noves centrals haurien de tenir en compte que encara hi ha moltes àrees mediambientalment molt importants que continuen mal representades a la xarxa Natura 2000 d'Espanya (Serrano et al., 2020). No obstant això, moltes investigacions coincideixen que, fins i tot amb una planificació de l'ús del sòl conservadora — reservant el màxim espai per a l'agricultura i altres usos —, és una bona oportunitat per complir amb els requisits plantejats per fer front al canvi climàtic (Shiraishi et al., 2019) si hi ha una planificació rigorosa i integral basada en la informació més precisa i actualitzada. Aquesta planificació de la Transició Energètica s'ha de prendre amb una perspectiva multidisciplinària i tenint en compte l'escala local, evitant la creació de nous però previsibles conflictes, mitjançant el disseny d'usos del sol mixtos que es poden adoptar per aconseguir ciutats més productives i autosuficients (Toboso-Chavero et al., 2019).

Una bona planificació requereix bones dades. No obstant això, les dades disponibles són insuficients i encara no és clar com serà la Transició Energètica. A part dels problemes territorials esmentats, una mala presa de decisions podria complicar problemes ja de per si complexos com la desigualtat o la pobresa (Moreno-Muñoz, 2021; Yin i Zhou, 2022). El cas d'Espanya és paradigmàtic perquè diversos canvis legislatius durant l'última dècada han afectat molt i han creat incertesa (Mérida-Rodríguez et al., 2015). Per a fomentar i facilitar el sorgiment d'iniciatives locals, és necessari tenir coneixement previ del potencial de generació d'electricitat a partir de fonts renovables i com la Transició Energètica s'està desenvolupant — també cal saber qui ho està fent i on s'està adoptant la FV. Com es veurà en aquest document, el paper de les administracions públiques és especialment important en aquest procés de construcció de coneixement.

1.1 Antecedents i justificació

A partir del projecte de recerca “Determinació del potencial d'autoabastiment elèctric dels municipis de la demarcació de Tarragona a partir d'energia fotovoltaica i eòlica instal·lada en entorns urbans” (Grup de Recerca d'Anàlisi Territorial i Estudis Turístics. Departament de Geografia. Universitat Rovira i Virgili. Projecte URV.FC03.01.00 (2021/09). Conveni marc Diputació de Tarragona-Universitat Rovira i Virgili 2020-2023), la demarcació de Tarragona, disposa a dia d'avui del coneixement del potencial tècnic d'autoabastiment municipal mitjançant fonts renovables (solar i eòlica) integrada en entorns urbans i periurbans. El coneixement d'aquest potencial pot permetre avançar en la transició energètica en els termes de l'article 19 de la LLEI 16/2017, de l'1 d'agost, del canvi climàtic: distribuïda, de proximitat i utilitzant espais ja alterats.

A nivell municipal es disposa, doncs, d'un coneixement del potencial d'autoabastiment mitjançant fonts renovables que podrà permetre impulsar projectes d'autoabastiment, tant per les pròpies institucions locals, com pel conjunt de la ciutadania i activitats econòmiques de cadascun dels municipis. Sobre aquesta base, el present projecte pretén donar a conèixer en quina fase de la transició energètica es troben els ajuntaments de la demarcació de Tarragona i, en concret, conèixer el grau de desenvolupament per part dels ajuntaments del potencial d'instal·lació de fotovoltaica en cobertes d'edificis municipals (ajuntaments, biblioteques, escoles, poliesportius, etc). També es pretén difondre la informació sobre el potencial d'aquests espais i fomentar el debat social. Amb tot plegat, es farà una tasca d'educació ambiental i de transferència de la recerca, i s'enquestarà als administradors dels edificis públics amb més potencial per a saber si:

- a. S'han donat passos cap a la instal·lació d'aquest tipus de instal·lacions.
- b. No s'ho havien plantejat fins al moment.
- c. Si han trobat dificultats en el procés i quines són.
- d. Si conèixer el potencial de generació els farà estudiar aquest tema amb més deteniment en el futur pròxim.

1.2 Objectius

L'anàlisi dels recursos energètics renovables a escala local ajudarà a establir la Transició Energètica desitjada, per tant, l'objectiu d'aquesta recerca és proporcionar nous mètodes per controlar l'adopció de la FV. A priori es considera que les administracions públiques tenen una gran responsabilitat a l'hora d'impulsar els canvis necessaris i sembla que en la majoria dels casos estan d'acord i, per exemple, a la UE s'estan dedicant abundants recursos a promoure la transició energètica. El finançament dels *NextGenerationEU* per a ser energèticament eficient, afegit a l'augment dels costs de l'electricitat dels últims anys ha catalitzat una major adopció de solucions de FV sobre teulada. No obstant això, encara queden moltes qüestions per resoldre i aquest estudi considera que les dades detallades són necessàries per respondre-les. Considerant tot l'anterior, els principals objectius d'aquesta recerca són:

1. Analitzar la fase de la transició energètica en què es troben les entitats públiques de la província de Tarragona. El projecte es centrarà en saber si els administradors dels edificis públics (ajuntaments, biblioteques, escoles, poliesportius, etc) són conscients del potencial de producció d'energia fotovoltaica dels seus terrats.
2. Difondre la informació sobre el potencial energètic d'aquests espais i fomentar el debat social.

Per a la consecució d'aquests objectius principals, caldrà assumir també els següents objectius específics:

3. Crear eines pel càlcul d'escenaris sobre el potencial de generació d'energia fotovoltaica als terrats dels municipis de la província de Tarragona, tenint en compte els principis de reproductibilitat i ciència oberta.
4. Definir una matriu d'escenaris probables sobre l'aprofitament futur dels terrats de la zona d'estudi per a la instal·lació de panells solars.
5. Establir una prioritació d'edificis públics de cada municipi segons la idoneïtat per a la producció d'energia fotovoltaica. Es tractarà de fer una mostra representativa en quant a la diversitat funcional dels edificis públics de cada municipi i tenint en compte la heterogeneïtat territorial de la província.

6. Determinar la fase de la transició energètica en la que es troben els administradors dels edificis públics a partir del grau d'autoconeixement del propi potencial de producció energètica.
7. Recopilar retroacció sobre les diferents causes de l'adopció (o no) de solucions tècniques, centrant-nos en la instal·lació de panells fotovoltaics als terrats dels edificis.

1.3 Estructura del document

Aquest document està organitzat de la següent manera. La secció 2 descriu el marc teòric i els factors rellevants, tot amb una referència als buits de recerca que es van identificar des d'aquest estudi. La secció 4 descriu el disseny de la metodologia i l'anàlisi de dades disponibles. A la secció 5, es proporciona una descripció detallada dels resultats i alguns elements de discussió. La secció 6 conclou l'estudi

2 MARC TEÒRIC

En aquest apartat s'analitzen els diferents factors que afecten a l'adopció de l'energia solar fotovoltaica, per una banda, i els factors locals com a difusors de les instal·lacions fotovoltaiques a partir de l'efecte veïnatge. També s'analitzen diverses metodologies emprades per a l'estimació del potencial de la FV en cobertes, i les oportunitats de recerca que representa per aquest projecte d'investigació. Aquest marc teòric permet dissenyar un qüestionari per a la demarcació de Tarragona basat en experiències internacionals prèvies.

2.1 Factors que afecten l'adopció solar FV

La decisió sobre l'adopció o descart d'instal·lacions solars FV es basa en molts factors que poden ser **factors endògens i exògens**. Els sistemes d'incentius, l'estructura del mercat i el canvi climàtic s'han identificat com noves oportunitats per a l'adopció d'energies renovables. Un altre aspecte és la voluntat dels consumidors d'adoptar aquestes solucions (Qureshi et al., 2017). Per tant, en general, algunes persones estan disposades a pagar més per uns serveis millors i fiables. Diversos estudis van revelar que un nivell d'ingressos més alts i d'educació superior estan correlacionats amb la decisió d'adoptar FV (Vaishnav et al., 2017; Alipour et al., 2020). En altres casos, alguns factors poden dependre completament del context. Per exemple, es va determinar que la no disponibilitat de la connexió de xarxa ha estat un factor principal d'adopció als països en desenvolupament (Muntasser et al., 2000). Un altre estudi recent desenvolupat als Països Baixos va revelar quatre factors que inclouen l'avantatge relatiu percebut de la tecnologia, la complexitat de la innovació, la influència social i el coneixement sobre les subvencions i els costos (Vasseur i Kemp, 2015). Va arribar a la conclusió que el cost del sistema FV va ser l'element principal darrere de la decisió d'adopció tant pels agents facilitadors com els no-facilitadors de la instal·lació d'un sistema FV.

Diversos estudis van trobar que els consumidors estan més preocupats pel cost que pel medi ambient o altres preocupacions (Palm, 2016) en l'adopció d'FV. La manca de consciència tecnològica entre els usuaris també es va identificar com una barrera clau als països en desenvolupament, però també es va donar suport a que la falta de consciència va conduir a la difusió de la desinformació entre els facilitadors potencials sobre els beneficis de la tecnologia (Muntasser et al., 2000). Un estudi

recent desenvolupat a Noruega va classificar fins a 9 barreres diferents per l'adopció de FV, depenent de tres perspectives: (1) Perspectiva de les persones, (2) Perspectiva del sector privat, i (3) la Perspectiva del sector públic. I aquestes barreres es poden classificar en tres aspectes: (1) Problemes financers, (2) Problemes d'intercanvi d'informació, i (3) Problemes de risc i incertesa (Xue et al., 2021).

Segons el model teòric de Roger (2003), els usuaris potencials poden visitar diferents fases en el procés d'adopció o no d'una innovació. Seguint aquest model, el procés pel qual es comunica l'adopció de noves tecnologies al llarg del temps que utilitza diferents canals i l'interès dels possibles facilitadors creix només quan comencen a reunir-se prou coneixements sobre la innovació. No obstant això, la personalitat, el comportament comunicatiu i les condicions socioeconòmiques són les característiques del coneixement previ dels individus. Així, cinc atributs d'innovació (1) l'avantatge relatiu, (2) compatibilitat, (3) complexitat, (4) *triabilitat* (capacitat de provar de primera mà una nova tecnologia), i (5) observabilitat poden determinar eventualment l'èxit o fracàs de una innovació. La **Taula 1** descriu cada atribut que afecta la taxa d'adopció de la innovació (Qureshi et al., 2017).

Taula 1.

Els cinc components de les innovacions identificats per Roger (2003).

Atributs	Definició
Avantatge relatiu	Grau en el que una innovació és percebuda com una bona idea o la tecnologia és valorada per un grup d'usuaris, mesurat en termes pràctics com avantatge econòmic, prestigi social, conveniència o satisfacció.
Compatibilitat	El grau en que la innovació és percepida com a consistent respecte a les experiències prèvies i les necessitats dels adoptants.
Complexitat	La dificultat percebuda respecte la comprensió i l'ús de la tecnologia.
Avaluabilitat	El grau en que la tecnologia es pot avaluar sense entrar en un compromís a llarg termini.
Observabilitat	El grau en que els resultats de l'adopció són visibles a altres persones.

Font: Qureshi et al., 2017

Estudis de casos, enquestes i entrevistes han suggerit que comptar amb la informació adequada pot estimular l'adopció de la FV. Per exemple, Palm (2016) va trobar que quan els actors locals promouen la FV, probablement, provoquen un augment en els impostos derivats de l'adopció localitzats al territori. Els adoptants perceben que els seminaris informals tenen una influència positiva en les seves decisions d'adopció (Palm, 2016). També s'ha demostrat que els efectes de parells

(veïnatge) augmenten els impostos sobre l'adopció de la FV (Palm, 2017). A Suècia, entrevistes amb adoptants de FV i no-facilitadors van aprofitar per descobrir i entendre informació rellevant per a l'adopció de la FV (Palm i Lantz, 2020). En realitat, seria interessant saber quin tipus d'informació resulta més útil pels potencials adoptants de fotovoltaica. Per exemple, Wang (2017) va analitzar l'actuació dels instal·ladors de FV a Califòrnia, aconseguint proves i relacions significatives entre les mides de les instal·lacions, distribució geogràfica de les operacions i tipus d'instal·lacions (verticals) que eren més eficients que altres sistemes.

Només uns pocs estudis van examinar explícitament les barreres i els facilitadors (factors positius i negatius) de la instal·lació de FV percebuts per propietaris no residencials. Reindl i Palm (2021) van realitzar una revisió de literatura i un estudi empíric, segons els quals als propietaris de Suècia se'ls va preguntar quines barreres i facilitadors perceben quan es tractava d'instal·lar sistemes FV. La **Taula 2** presenta les barreres identificades en investigacions anteriors que també es van trobar en el seu estudi empíric. Aquestes barreres inclouen finançament, informació/coneixement, barreres administratives i organitzatives. De la mateixa manera, es van identificar uns certs facilitadors econòmics, com l'oportunitat de vendre electricitat auto-produïda (Reindl i Palm, 2021). Com un fet interessant, els mapes solars es van esmentar com un facilitador en estudis anteriors, però la manca d'aquests es va considerar una barrera a l'estudi suec. Els autors expliquen que els diferents contextos institucionals dels països fan que algunes barreres i facilitadors siguin més o menys rellevants en uns llocs que en altres. D'aquesta manera, les barreres i els facilitadors de l'adopció de la FV no són estàtics, sinó que han de ser entesos en els seus entorns institucionals i culturals (Reindl i Palm, 2021).

Taula 2.

Barres a la instal·lació fotovoltaica esmentades pels enquestats suecs.

Habitualment anomenada	Moderadament anomenada	Només una vegada
<ul style="list-style-type: none">• Barreres econòmiques.• Impostos, falta d'ajuts.• Barreres normatives.• Administratives i organitzatives.• Barreres de disseny.• Barreres de manteniment.• Barreres per les tipologies constructives.	<ul style="list-style-type: none">• Falta d'informació o coneixement.• Barreres tecnològiques.• Seguretat i assegurances.• Falta de capacitat d'emmagatzematge.• Contractes actuals de subministrament.	<ul style="list-style-type: none">• Només s'instal·larà calefacció comunal.• Inestabilitat política a escala nacional.• Les àrees més extenses per a instal·lar son els edificis residencials.• Sector construcció conservador.• Falta de càlculs detallats sobre el potencial (mapa solar).• Instal·lar és una iniciativa que consumeix molt de temps.

Font: Reindl and Palm (2021).

2.2 Efectes de parells (veïnatge) com a variacions locals en la difusió FV

La revisió literària mostra que els factors locals juguen un paper important en la difusió de la fotovoltaica. Els efectes de parells es van estudiar per trobar que les persones tenen més probabilitats d'adoptar FV com a resultat d'adopcions anteriors en el seu veïnat immediat (Palm, 2016). Diversos estudis han proposat models i han quantificat aquests efectes entre iguals com a bastant significatius (Noll et al., 2014; Rai et al., 2016; Mundaca i Samahita, 2020). Schelly (2014) va trobar que el suport dels primers facilitadors de FV sovint va resultar útil pels nous usuaris. Com que els sistemes de FV en espais residencials són típicament visibles, també hi ha un cert component passiu als efectes parells. Rai et al. (2016) van trobar que els facilitadors de FV a Texas (EUA) havien estat influenciats per adoptants anteriors dins el seu veïnat, tant a través d'efectes passius com actius. Brudermann et al. (2013) van establir que el boca a boca i l'assistència a les reunions informatives van ser factors importants en la presa de decisions per a l'adopció de FV per agricultors austriacs.

Els efectes de parells també poden ser impulsats per organitzacions actives. Noll et al. (2014) van mostrar com les organitzacions comunitàries favorables a l'adopció de la FV als Estats Units, van orientar les seves activitats aconseguint efectes parells en els companys propers. També van trobar que les xarxes existents a la comunitat i la presència d'institucions financeres locals que concedeixen préstecs amb interessos baixos van ser factors importants que van augmentar la taxa de difusió de l'energia fotovoltaica (Palm, 2017). Comprendre el funcionament d'aquests factors locals pot tindre implicacions pràctiques i podria ajudar a decidir com conduir la Transició Energètica. Per exemple, Curtius et al. (2018) van considerar que en alguns contextos un enfocament de “*bola de neu*” podria actuar millor que oferir incentius uniformes a escala nacional.

2.3 Metodologies per a l'estimació del potencial FV a cobertes

Els sistemes energètics descentralitzats basats en FV són prometedors, especialment en entorns urbans. No obstant això, la millor eficiència d'aquests sistemes requereix estimacions precises i fiables del subministrament d'energia, juntament amb el disseny d'un sistema intel·ligent de distribució que es pot integrar amb xarxes elèctriques. Això vol dir que hi ha moltes aplicacions on aquestes dades

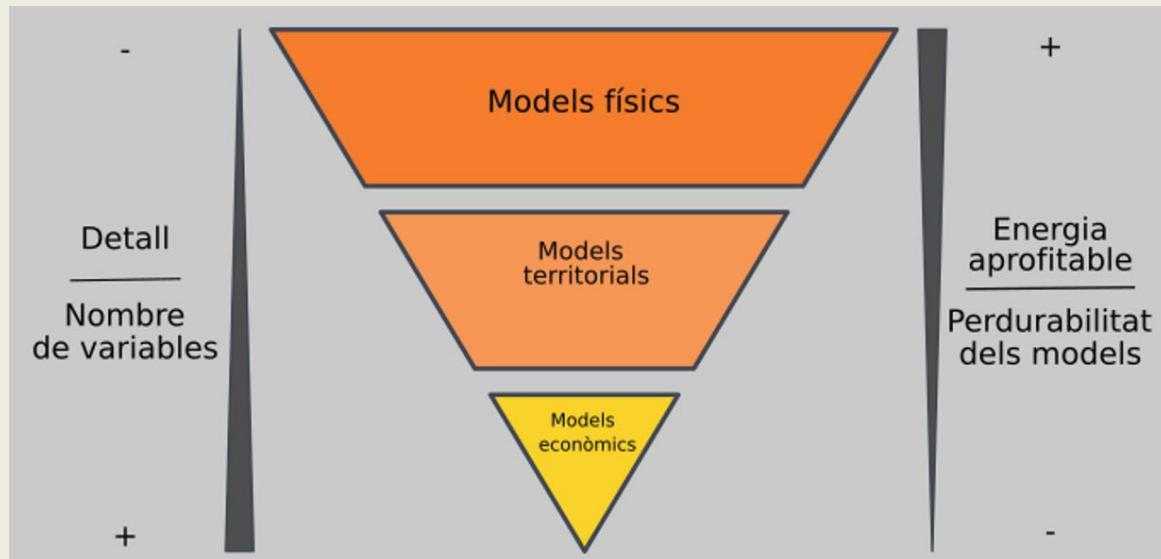
detallades podrien ser útils. En altres paraules, cal conèixer on es genera l'energia FV per a saber com regular millor el mix d'energia (p. Ex. centrals tèrmiques, nuclear, etc).

El potencial tècnic és l'energia que es podria generar si tota la superfície del sostre adequada estigués ocupada per una instal·lació FV (Figura 1). Aquesta xifra és un punt de referència emprat habitualment que es pot utilitzar per quantificar la generació potencial de FV, considerant la seva disponibilitat i qualitat, el rendiment de la tecnologia i l'àrea física adequada per a la seva instal·lació (Gagnon et al., 2018). El potencial tècnic no considera factors econòmics, de creixement o d'integració de la xarxa. Per descomptat, no es tracta d'un disseny de desplegament particular ni d'una predicción d'un desplegament previst. Només representa un límit superior a la generació potencial actual d'una tecnologia. Així, en aquest estudi només és considerat i després modelat el potencial teòric i tecnològic.

Molts autors estan estudiant la predicción solar a curt termini (*nowcasting*) de la radiació solar i les dades o models que podrien ajudar a equilibrar els diferents sistemes de producció d'energia elèctrica. Per exemple, Bright et al. (2018) van proposar un enfocament per satèl·lit derivat de la transmissió de potència FV utilitzant dades de consum en temps real, mentre Kruitwagen et al. (2021) van crear un inventari global de instal·lacions d'energia solar fotovoltaica a una petita/mitjana escala. Tanmateix, les estimacions de la capacitat actual són sorprendentment incertes i fins i tot coneixent la capacitat instal·lada d'un sol país, és sovint propens a imprecisions i omissions a causa de la fragmentació del mercat i les regulacions canviants. No és un tema trivial, sinó que comptar amb dades completes i precises serà crucial per a la Transició Energètica (Stowell et al., 2020).

Figura 1.

Enfocament de dalt a baix per estimar el potencial d'energia solar.



Font: Hao et al (2022)

Diversos autors han utilitzat dades basades SIG, especialment a partir de dades LiDAR per construir enfocaments robustos i potents per proporcionar estimacions d'alta resolució del potencial fotovoltaic solar de les cobertes. S'utilitzen habitualment molts SIG comercials i programari lliure per calcular diverses variables com l'azimut de les cobertes, la pendent, les zones buides de les cobertes i la radiació solar, així com extreure les característiques geomètriques dels edificis (Gassar i Cha, 2021).

Gassar i Cha (2021) proporcionen una revisió exhaustiva dels enfocaments d'estimació de potencial solar fotovoltaic basats en SIG que s'han aplicat a diferents escales. Hi ha exemples d'estudis que calculen el potencial fotovoltaic per a barris o ciutats, (Quirós et al., 2018; Gooding et al., 2015; Palmer et al., 2018) per països (Lukovi et et al., 2015; Huld, 2017), o fins i tot per a la Unió Europea (Bódis et al., 2019). Aquests i altres mètodes esmentats en la revisió han estat discutits i classificats en:

1. Aproximacions de mostreig
2. Aproximacions geostàtiques
3. Aproximacions de modelatge
4. Enfocaments d'aprenentatge automàtic

Els enfocaments de modelatge es consideren bones metodologies per quantificar els efectes de múltiples variables relacionades amb les estimacions del potencial FV sobre cobertes, com calcular característiques de diferents formes o estimar la radiació solar des de les cobertes, especialment a escala de barris o ciutats. No obstant això, aquestes aproximacions són problemàtiques per a fer estudis que abasten grans extensions de territori, com els estudis a nivell nacional, a causa de que es requereix un gran nombre de càlculs (*heavy calculations*) per obtenir resultats satisfactoris. Els enfocaments d'aprenentatge automàtic són una alternativa prometedora als enfocaments de modelatge, que requereixen càlculs pesats per calcular totes les variables d'entrada que condueixen al potencial solar fotovoltaica de les cobertes. En particular, l'aprenentatge automàtic és un camp de creixement ràpid que s'utilitza en nombroses àrees per aprofitar les grans quantitats de dades disponibles.

Molts autors estan desenvolupant noves metodologies que integren SIG amb l'aprenentatge automàtic (Mohajeri et al., 2018; Yin i Zhou, 2022; Li et al., 2021) per proporcionar una alternativa precisa i menys exigent computacionalment a enfocaments basats en dades SIG-LiDAR. Aquestes alternatives contribuiran significativament a que poc a poc es vagin generalitzant les estimacions a gran escala (regions, països, etc) del potencial FV dels sostres.

Segons la revisió realitzada per Freitas et al. (2015), encara hi ha moltes limitacions dels mètodes de modelatge SIG que requereixen més desenvolupament, destacant que el nivell de precisió de les diverses dades d'entrada d'una simulació deuria convergir. L'ús de dades LiDAR també té limitacions ressaltant els errors revelats per aquest tipus de dades, principalment en algunes zones molt properes a les façanes. Alguns models de radiació solar potencial, encara adopten aquesta metodologia més senzilla com un compromís entre resultats acceptables amb un temps de càlcul raonable. RADIANCE, Daysim i SOLENE són anomenats com uns dels millors programaris capaços de realitzar simulacions detallades d'anisotropia i specularitat de llum, així com inter- i multi-reflexions. Per a models més bàsics, el fet que la pendent o l'orientació no es tingui en compte es considera una limitació crítica (Freitas et al., 2015). Altres limitacions coneudes del model són si es consideren superfícies planes o superfícies de teulades més realistes, façanes amb finestres o sense, si es considera la vegetació en el context urbà com a un filtre o com una capa

sòlida, la conversió de la radiació solar en energia elèctrica, etc. Finalment, també és important definir com validar els models, el que normalment requerirà dades de camp.

Quan es tracta de les limitacions de la cartografia sobre radiació solar potencial, actualitzar les dades LiDAR és de primordial importància. Sempre existeix el risc de proporcionar dades obsoletes i representacions inexactes de la prevalença d'energia solar (p. Ex. Creant un model que no tingui en compte lesombres generades pels edificis més nous). D'altra banda, els requisits d'instal·lació i les limitacions de les diferents normatives inclouen una sèrie de criteris que sovint no es poden avaluar únicament a partir de les dades disponibles i, per tant, és probable que l'àrea utilitzable de qualsevol coberta difereixi de l'estimació (Freitas et al., 2015). Finalment, cal subratllar que els costos associats al desenvolupament de mapes en comparació amb els beneficis s'ha de sospesar acuradament. Després d'un gran avanç en el mapatge solar en 2D, les eines SIG s'estan adaptant progressivament a la representació en 3D detallada i l'anàlisi espacial. Per exemple, amb les últimes versions de QGIS es poden gestionar millor les dades de núvols de punts. Quan les eines d'anàlisi 3D estiguin disponibles, serà interessant abordar la idea d'un veritable cadastre solar en 3D. En aquest context, el desenvolupament de bases de dades que gestionen geometries 3D, tals com PostSIG o Oracle, i llenguatges de consulta espacials 3D, per exemple, Spatial Structured Query Language (SQL- spatial) també representen un repte important.

2.4 Oportunitats de recerca

Comparant els objectius d'aquest treball amb la literatura anterior, trobem diversos nínxols de recerca que es resumeixen de la següent manera:

- El modelat basat en SIG és computacionalment exigent, especialment per a àrees d'estudi molt àmplies, com pot ser una província o una regió.
- El coneixement sobre els efectes de parells que influeixen en el nivell d'adopció de FV prové principalment de països que representen mercats fotovoltaics bastant madurs. Com que s'assumeix que els factors locals juguen un paper important en l'etapa inicial del procés de difusió, es podrien estudiar altres contextos per crear teories més robustes i generalitzables. A més, pocs estudis han comparat la importància de (a) veïns, (b) organitzacions locals que promocionen energia fotovoltaica, i (c) el paper d'altres factors locals, com variacions en la implementació local de polítiques nacionals.
- En la majoria dels estudis, les tècniques de modelització són independents de l'ús actual dels edificis, llavors són obres en les quals s'ha analitzat el potencial en zones residencials, comercials i industrials (López Prol i Steininger, 2020), fins i tot en ubicacions específiques com aeroports, trens, centres educatius, entre d'altres (Sreenath et al., 2020; Zhong et al., 2020; Chen et al., 2022; Thai i Brouwer, 2021; Julieta et al., 2022).
- L'escassetat de bases de dades SIG detallades de diferents tipus de dades — MDE, 3D, cadastre, instal·lacions fotovoltaïques ja existents, el consum d'energia, etc— és un problema que requereix més atenció ja que hi ha nombroses aplicacions relacionades amb la Transició Energètica que depenen d'aquestes dades.

Tenint en compte aquests nínxols de recerca, el nostre estudi els abordarà amb diverses contribucions:

- Aquest estudi crea un nou flux de treball automàtic per descarregar dades públiques, creant un model de radiació solar potencial, definint-ne les àrees de teulades més adequades per a la implantació de la FV, creuant aquest potencial amb instal·lacions de FV reals i extraient una nova visió. Això s'aplica a una escala relativament gran a la província de Tarragona (Catalunya).
- Tot i que aquest estudi no fa un enfocament qualitatiu, analitzem el potencial dels edificis segons diferents usos (residencials, serveis públics, industrials, agrícoles, etc). Finalment la base de dades s'aprofita per a analitzar el potencial dels edificis de serveis públics.

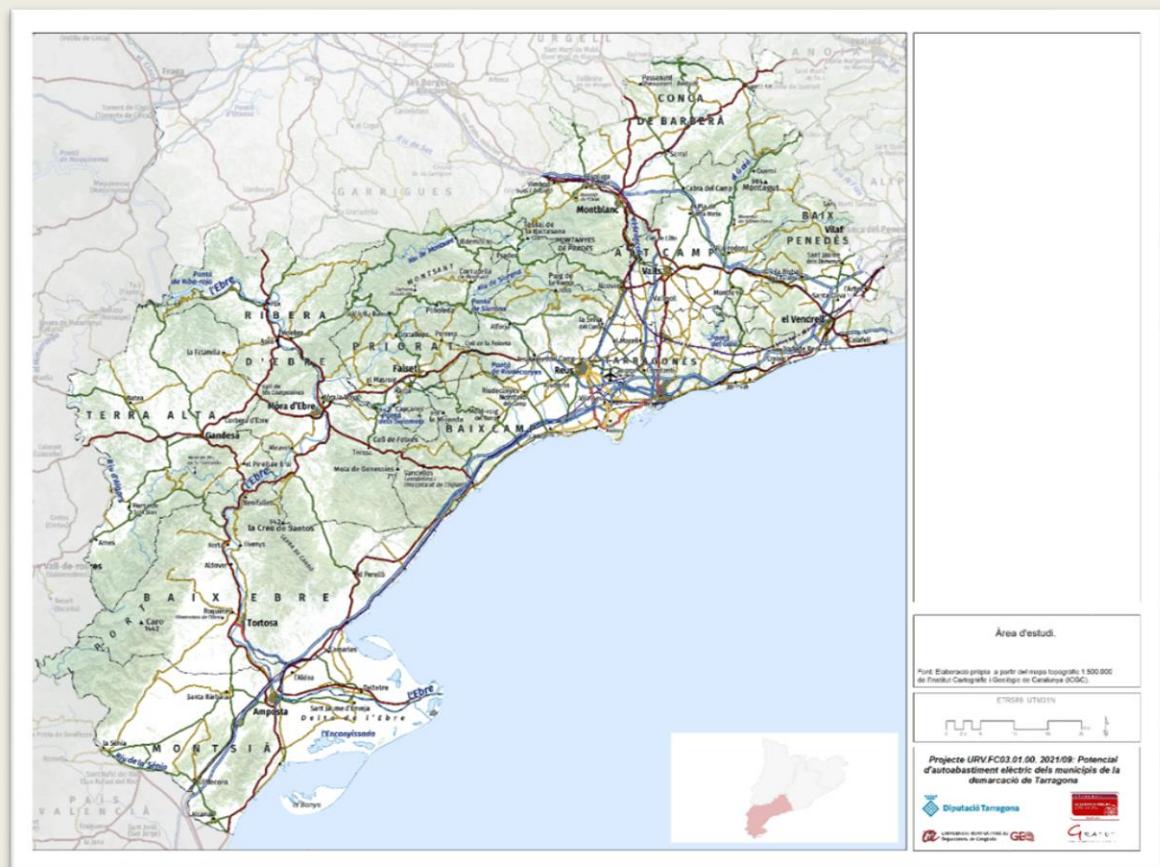
- Pel que sabem, aquest és el primer estudi d'aquest tipus que planteja comparar l'adopció d'aquestes tecnologies entre les esferes pública i privada. Cal dir que no hi ha massa estudis qualitatius (barreres, efectes de parells) fora de les zones residencials.
- Aquesta investigació utilitza només les dades publicades per diferents administracions espanyoles i catalanes i s'explica com els conjunts de dades van ser analitzades amb SIG i programari lliures.

3 ÀMBIT TERRITORIAL

L'àmbit territorial es correspon amb els 184 municipis que conformen la demarcació de Tarragona. Es tracta d'un territori molt heterogeni, tant pel que fa a la superfície municipal, l'orografia, la distribució de la superfície municipal entre els diferents usos del sòl, la quantitat i densitat de població i el pes que hi tenen les diferents activitats econòmiques que s'hi duen a terme. Uns elements que condicionen tant els consums anuals d'electricitat, com la major o la menor disponibilitat d'espais potencialment aptes per generar energia elèctrica a partir de plaques fotovoltaïques o aerogeneradors en els termes de l'objectiu d'aquesta investigació.

Figura 2.

Àrea d'estudi.



Font: Saladié et al (2022)

El conjunt de municipis de la demarcació de Tarragona s'organitzen administrativament en 10 comarques i 3 àmbits territorials. De l'àmbit del Camp Tarragona en formen part les comarques de l'Alt Camp, el Baix Camp, la Conca de Barberà, el Priorat, i el Tarragonès; de l'àmbit de les Terres de l'Ebre en formen part les comarques del Baix Ebre, el Montsià, la Ribera d'Ebre, i la Terra Alta; el Baix Penedès forma part de l'àmbit del Penedès, juntament amb l'Alt Penedès, el Garraf i la meitat sud de la comarca de l'Anoia, aquestes darreres situades fora de l'àmbit de la demarcació de Tarragona (**Figura 2**).

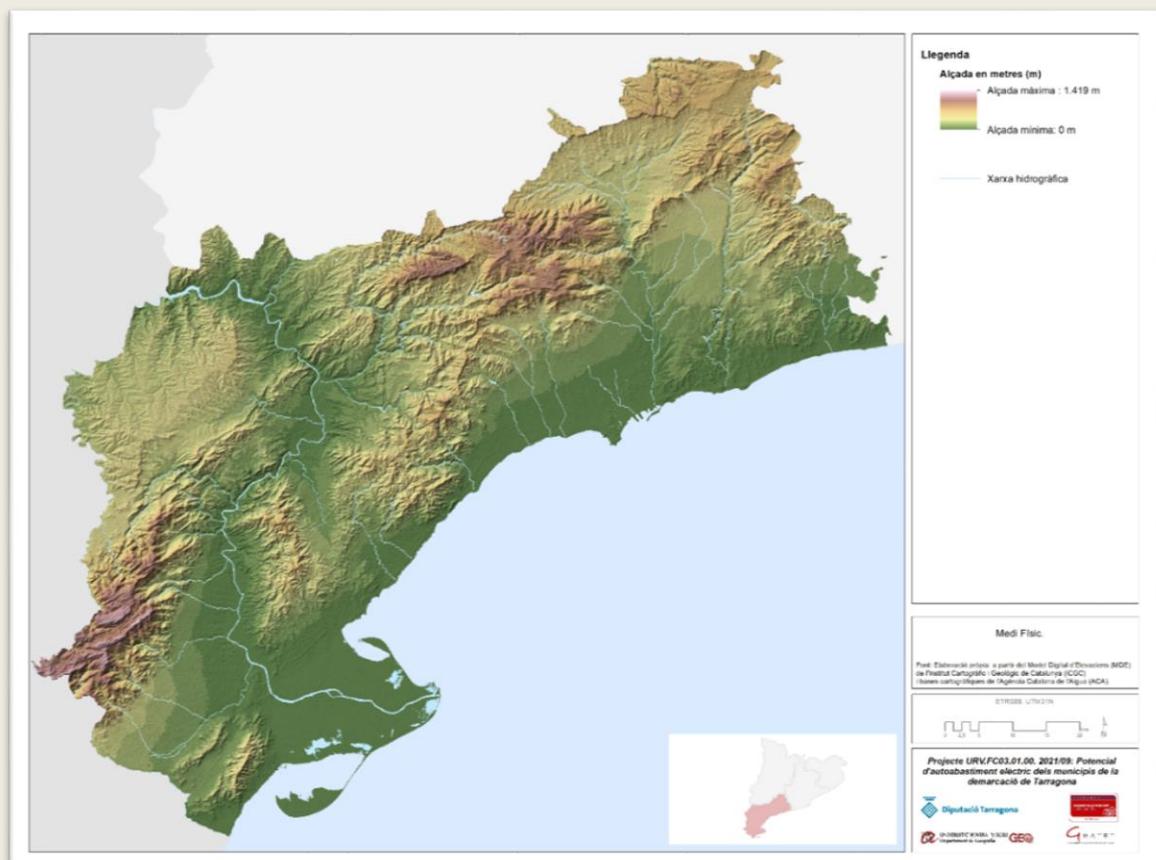
La demarcació de Tarragona està situada al sud de Catalunya i fent frontera amb el País Valencià, al sud, i l'Aragó a l'oest. Ocupa una superfície de 630.638,1 hectàrees (el 19,64% de Catalunya) i té una població de 826.930 habitants (el 10,7% de Catalunya).

Les principals aglomeracions urbanes es situen a l'àrea de Reus-Tarragona i al llarg del litoral entre Cambrils i Cunit. També hi ha assentaments importants entorn de les capitals de comarca, especialment a Tortosa, Amposta i Valls. Les principals vies de comunicació, viàries i ferroviàries, són les que ressegueixen en paral·lel al litoral, entre el Montsià i el Baix Penedès, i que adopten una especial densitat a l'entorn dels assentaments residencials, industrials i turístics del centre del Camp de Tarragona. Hi ha altres eixos de comunicació importants com son l'eix de l'Ebre, entre Amposta i el nord de la Ribera d'Ebre, i l'eix del Francolí, entre Tarragona i la demarcació de Lleida, passant per Montblanc. El port de Tarragona, juntament amb el complex petroquímic, representen els assentaments amb major empremta territorial, tant per la seva extensió com per les vinculacions socioeconòmiques i ambientals.

El Delta de l'Ebre és la principal singularitat geogràfica de la demarcació, representant un dels principals sistemes deltaics de la Mediterrània. L'estructura física de la demarcació de Tarragona s'explica fonamentalment a partir de tres elements (**Figura 3**): la serralada Prelitoral, amb les seves ramificacions, que transcorre des de la Conca de Barberà i l'Alt Camp fins als Ports; la plana del Camp entre l'Hospitalet de l'Infant (Baix Camp) i el Pont d'Armentera (Alt Camp); i la vall del riu Ebre i el seu delta, des del nord de la Ribera d'Ebre fins la desembocadura. Entre les principals serres i blocs muntanyosos hi destaquen els Ports, el Montsant,

i les Muntanyes de Prades, conjuntament amb serres menors com Pàndols-Cavalls, serra del Montsià, Cardó-Boix, Muntanyes de Tivissa-Vandellòs, Llaberia-Colldejou, el Bloc del Gaià, o el Montmell. A més de la gran plana del Camp, també destaquen la plana del Baix Ebre-Montsià i la plana del Penedès. Als extrems nord i sud de l'interior de l'àmbit d'estudi s'hi identifiquen els altiplans de la Baixa Segarra i de la Terra Alta, respectivament. Diverses conques internes, com els Burgans, la Cubeta de Móra i Baix Priorat, o la Conca de Barberà, acaben de configurar el perfil físic de la demarcació. El front litoral de la demarcació és de 308,2 quilòmetres que representen el 35,4% del litoral català.

Figura 3.
Medi físic de la demarcació de Tarragona

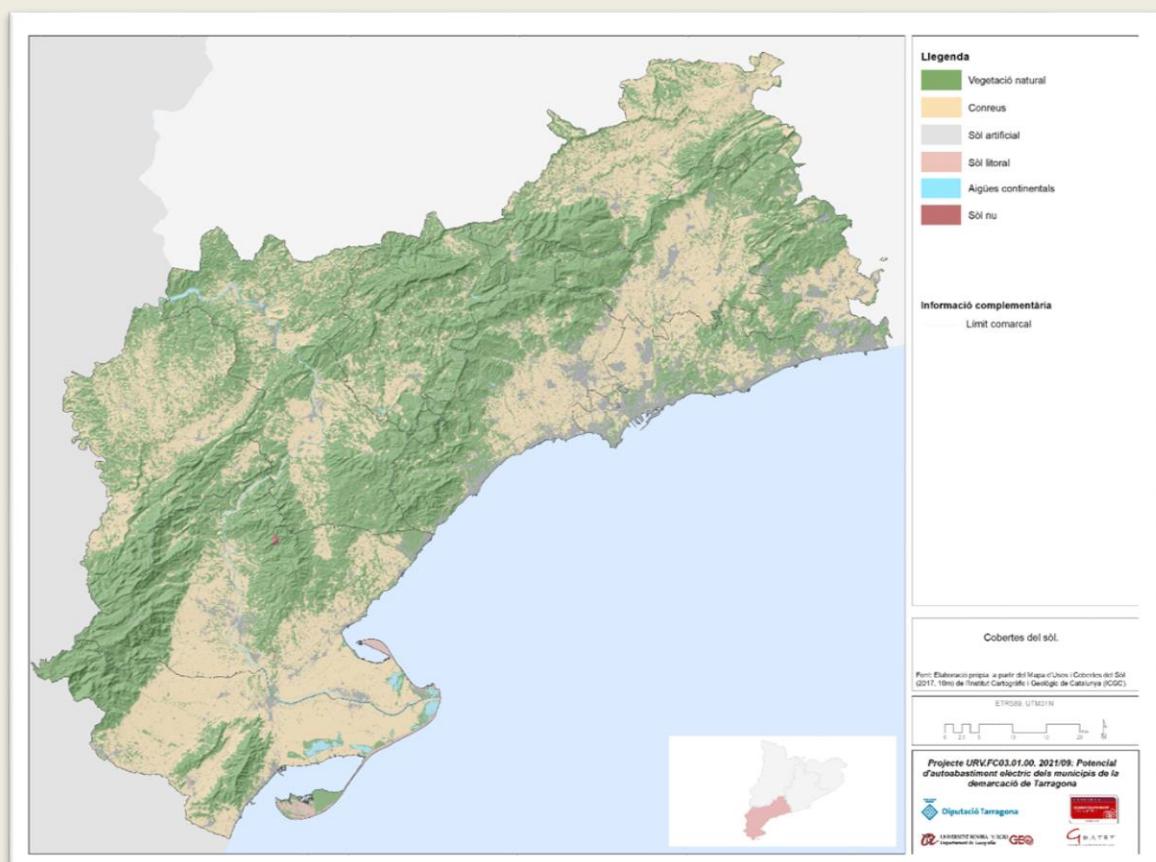


Font: Saladié et al (2022)

Només una mica més del 2% de la superfície de la demarcació es troba per sobre dels 1.000 metres d'altitud, amb el Caro (1.419 metres) i el Tossal de la Baltasana (1.202 metres) com a cims més destacats. Les terres baixes (<400 metres), ocupen més del 66% de la superfície (418.468,4 hectàrees). Tot i que les altituds màximes son més aviat modestes l'estructura física de la demarcació és complexa, especialment a les comarques interiors. Comarques com el Priorat tenen més del 86% de la superfície amb una pendent superior al 20%, mentre que el Baix Camp, la Conca de Barberà, el Baix Penedès o la Ribera d'Ebre, tenen aproximadament el 50% de la seva superfície amb més del 20% de pendent.

Figura 4.

Cobertes del sòl de la demarcació de Tarragona.



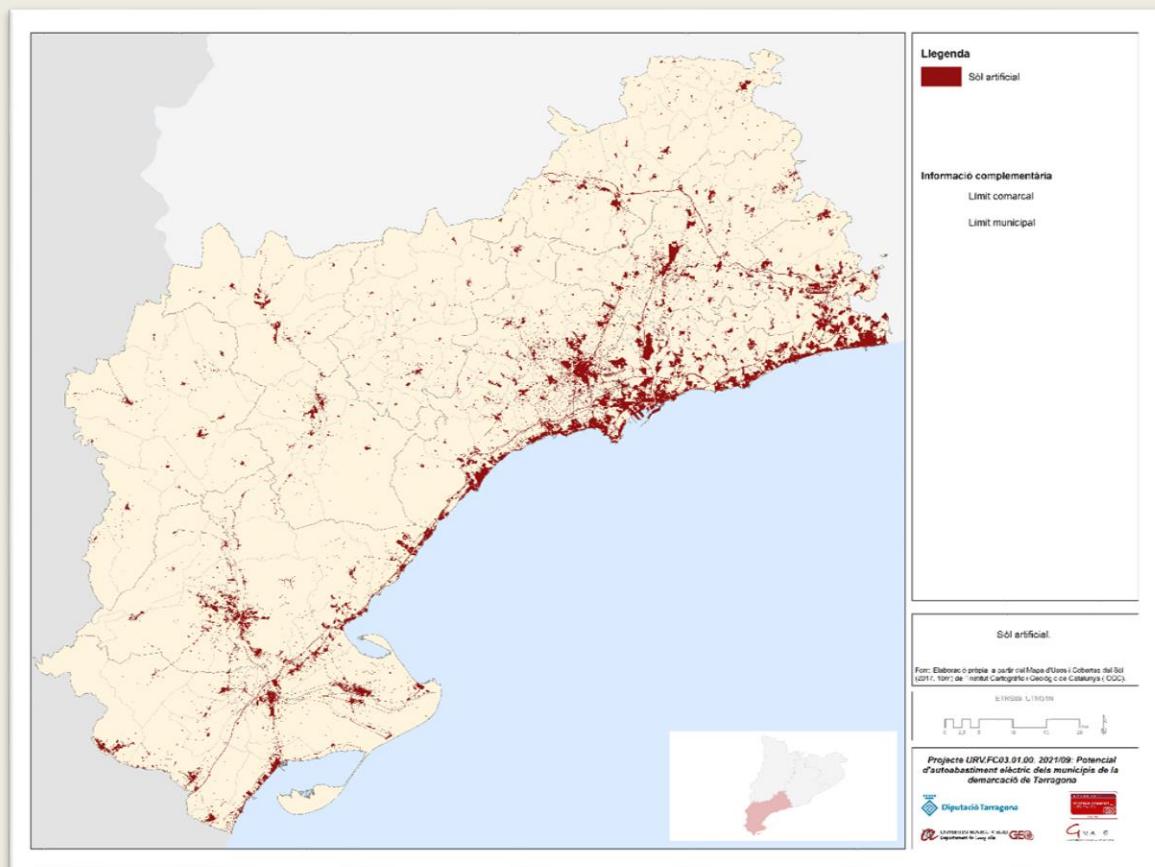
Font: Saladié et al (2022)

L'anàlisi de la distribució i localització de les cobertes del sòl (**Figura 4**) presenta una clara correlació amb l'estructura del relleu. Més de la meitat de la superfície (55,7% i 351.095,7 hectàrees) de l'àmbit d'estudi està recoberta per masses forestals, que principalment es distribueixen pels espais amb majors

pendents definits per les serres i massissos muntanyosos del Camp de Tarragona i les Terres de l'Ebre. Els conreus es situen a les planes i replans (plana del Camp, Conca de Barberà, plana del Baix Penedès, Burgans-Cubeta de Móra—Baix Priorat, Terra Alta, plana del Baix Ebre-Montsià, i Delta de l'Ebre), i ocupen una superfície de 239.266,8 ha. que representen el 37,9% de la superfície de l'àmbit d'estudi. Per la seva banda, els espais urbans i les infraestructures (sòl artificial) ocupen el 5,2% de la superfície amb 33.049,5 ha., i principalment es concentra a l'entorn de Reus i Tarragona i el front litoral del Camp i el Baix Penedès (**Figura 5**). Altres taques urbanes més important apareixen a l'entorn de les capitals comarcals i al llarg de les principals vies de comunicació (eix mediterrani, eix de l'Ebre, eix del Francolí). L'espai litoral conformat per les platges ocupa una superfície de 2.776,1 ha., que representa el 0,4% de l'àmbit d'estudi, mentre que les aigües continentals (llacunes, embassaments,...) ocupen 4.265,2 ha. que representen el 0,7% de la superfície. El sòl nu, de cingleres i espais sense vegetació natural, només ocupen 117,9 ha. i el 0,02% de la superfície.

Figura 5.

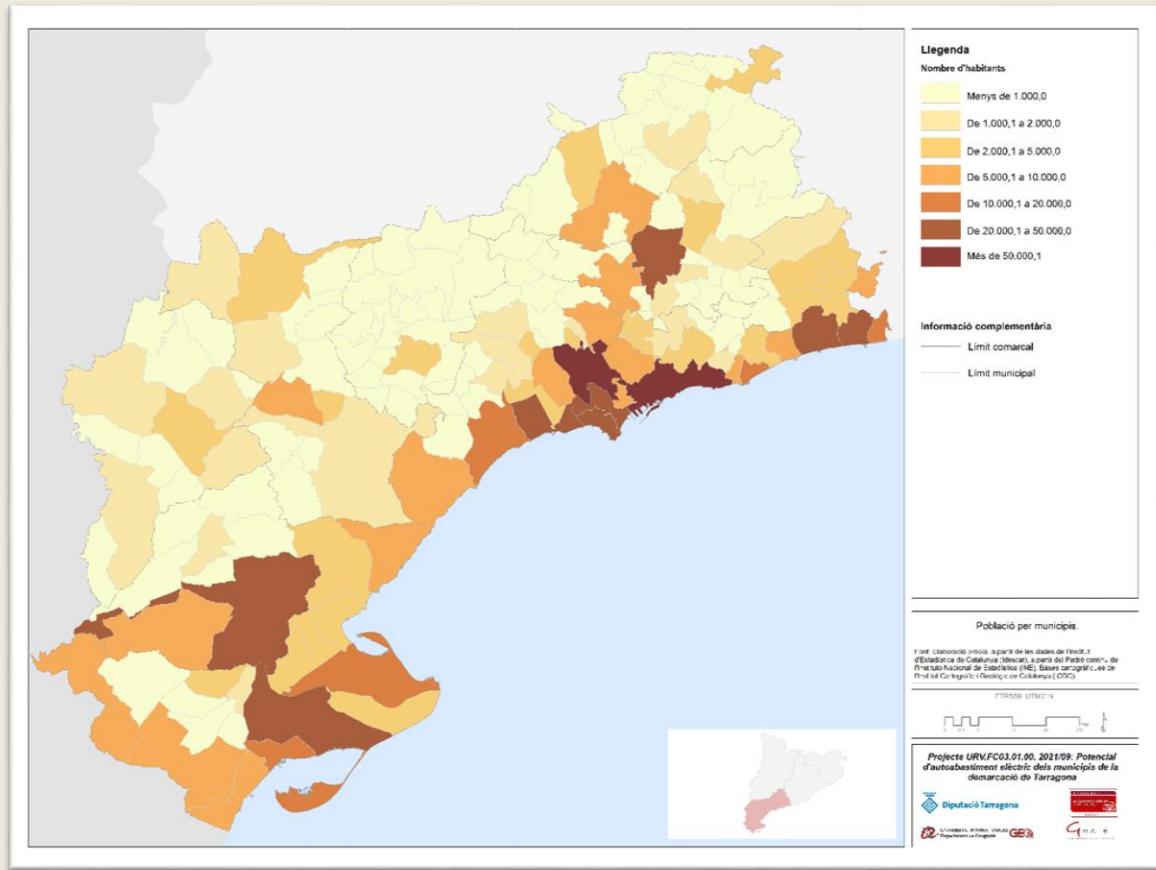
Sòl artificial de la demarcació de Tarragona.



Font: Saladié et al (2022)

A nivell demogràfic (**Figura 6**) destaca el fet que una mica més de la meitat dels municipis (53,3%) tenen menys de 1.000 habitants, i es situen sobretot a l'interior de la demarcació (Terra Alta, interior del Baix Ebre, Ribera d'Ebre, Priorat, interior del Baix Camp, Conca de Barberà, i nord de l'Alt Camp i el Tarragonès). El conjunt de municipis amb menys de 5.000 habitants representen el 83,1% del total de municipis. Només hi ha dos municipis, Reus i Tarragona, que tinguin més de 100.000 habitants. Tot i això, hi ha 8 municipis amb població per sobre dels 20.000 habitants, com son Tortosa, Amposta, Cambrils, Salou, Vila-seca, Valls, El Vendrell i Calafell. La resta de municipis amb població important (entre els 5.000 i 10.000 habitants) es situen al litoral i a l'eix del Francolí entre Reus-Tarragona i Montblanc. Si s'analitzen les densitats (**Figura 7**) s'observa clarament com l'espai amb major congestió demogràfica, i també urbana, és l'espai comprés entre Reus i Tarragona, i al litoral entre Cambrils i Cunit. El litoral del Baix Ebre i Montsià, l'eix del Francolí i la corona de municipis de l'entorn de Reus i Tarragona, també presenten densitats importants. Els municipis amb densitats de més baixes, per sota dels 50hab./km² i que representen el 56,5% dels municipis, es troben a la segona línia del litoral i a l'interior de la demarcació.

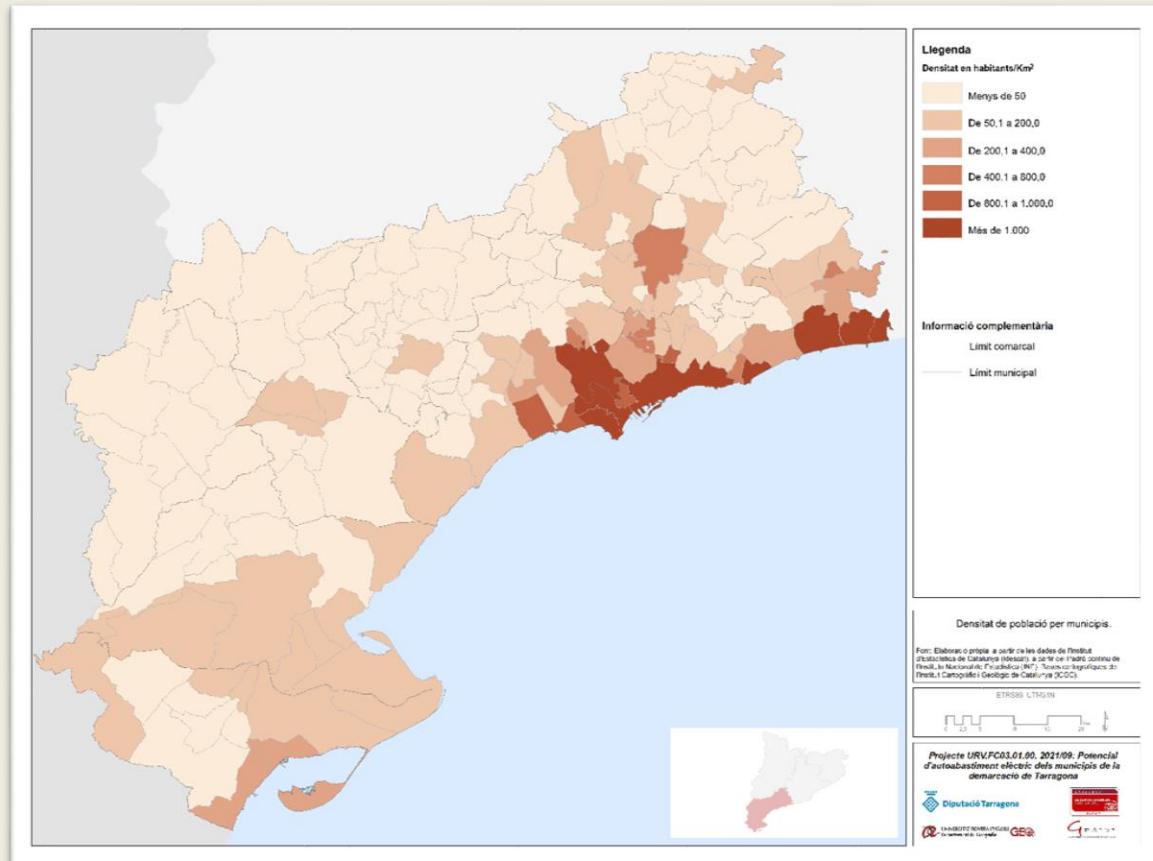
Figura 6.
Població per municipis de la demarcació de Tarragona.



Font: Saladié et al (2022)

Figura 7.

Densitat de població per municipis de la demarcació de Tarragona



Font: Saladié et al (2022)

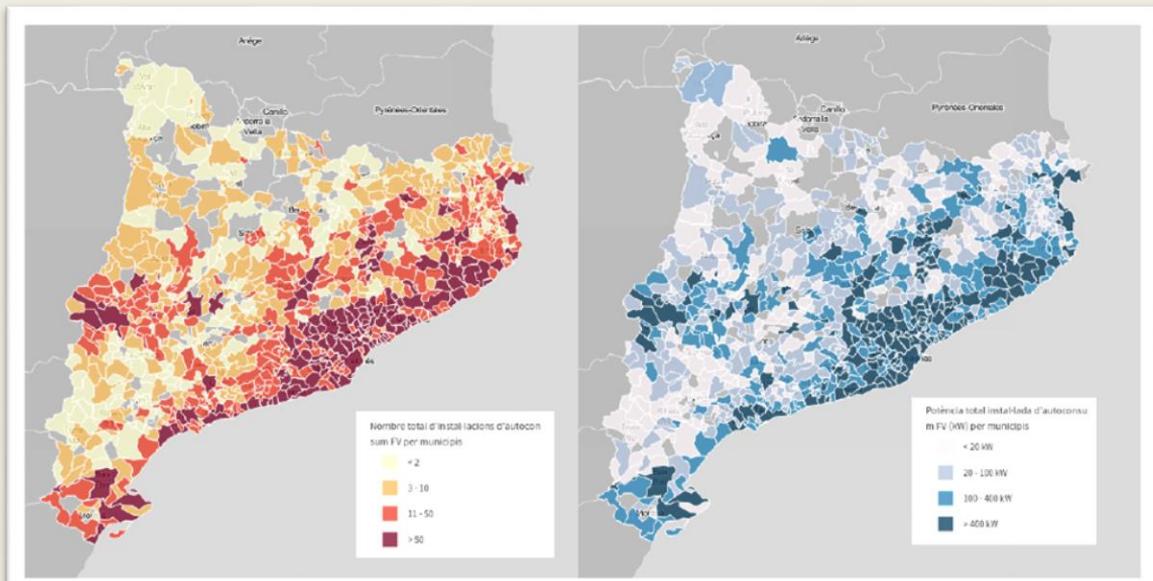
En relació al consum elèctric, el consum anual mitjà (2013-2020) de tota la província de Tarragona és de 6.437,73 GWh, que representa el 16,2% del consum total d'electricitat a Catalunya. La característica principal del consum mitjà anual d'electricitat a Tarragona és que només quatre municipis (Tarragona, 1.457,87 GWh; El Morell, 820,63 GWh; La Pobla de Mafumet, 596,66 GWh; Reus, 443,97 GWh) consumeix tanta electricitat (3.319,1 GWh) com la resta dels 180 municipis (3.118,6 GWh). En altres paraules, el 2,2% dels municipis de la regió consumeixen el 51,6% d'electricitat. Això s'explica principalment per la presència del complex petroquímic, que és una indústria electrointensiva, així com una concentració de població i activitat econòmica a Tarragona i Reus. A més, hi ha deu municipis de la província amb un consum anual mitjà per sobre de 100 GWh (Tortosa, 255,88 GWh; La Selva del Camp, 183,95 GWh; L'Arboç, 158,72 GWh; Valls, 156,82 GWh; Salou,

156,71 GWh; Cambrils, 138,31 GW; El Vendrell, 130,30 GWh; Vila-seca, 123,73 GWh; Montblanc, 114,08 GWh; i La Riba, 107,55 GWh), així que en total, 14 municipis de la regió consumeixen el 75,3% de l'electricitat (4.844,74 GWh).

La **Figura 8** mostra la producció fotovoltaica d'autoconsum a Catalunya el 2022. Fins al març del 2022, a Catalunya eren 43.204 les instal·lacions d'autoconsum, amb una potència instal·lada de 345,82 MW. De la província de Tarragona es va informar que tenia 5.627 instal·lacions d'autoconsum (13%), amb una potència instal·lada de 41,37MW (12%).

Figura 8.

Instal·lacions d'autoconsum amb FV a Catalunya (fins març 2022). Esquerra: nombre d'instal·lacions fotovoltaiques per municipi; Dreta: kW totals per municipi.



Font: ICAEN

4 METODOLOGIA

En aquest apartat s'estableix la metodologia definida per calcular el potencial de generació d'electricitat mitjançant fonts d'energies renovables (solar) en cobertes d'edificis. La determinació del potencial segueix una metodologia similar a la descrita per Gagnon et al. (2018) i també similar a la recollida al projecte DIPTA-URV 2021/22. Primer, calculem el potencial de la radiació solar, per continuar amb el càlcul del potencial de generació d'electricitat amb FV —tenint en compte les limitacions tècniques introduïdes per la disponibilitat d'espai adequat—, l'eficiència de conversió de cada tecnologia, i així successivament. Aquesta investigació no entra en els detalls del potencial econòmic o social (i.e. costos, organització social, aspectes legislatius, entre altres). Aquest document utilitza un procediment de cinc passos en l'anàlisi del potencial fotovoltaic disponible de les cobertes:

1. Compilació i sistematització d'experiències reguladores, teòriques i altres sobre el potencial de generació d'electricitat a través de fonts renovables en entorns urbans. Aquesta primera fase, ha consistit en la sistematització de la bibliografia sobre la generació d'electricitat a través de la solar fotovoltaica.
2. Obtenció d'informació dels ajuntaments sobre el grau d'implementació de FV en cobertes d'edificis municipals. En aquesta segona fase es genera un qüestionari *on-line* (<https://forms.office.com/r/BkxFMePrmM>) que els diferents responsables polítics i/o tècnics dels ajuntaments responen de manera voluntària (**Figura 9**). L'enquesta *on-line* es va completar des de la plataforma Microsoft 365 (Forms) amb que compta la URV.
3. Buidatge de la base de dades de localitzacions d'instal·lacions d'autoconsum de l'ICAEN, i posterior relocalització manual amb QGIS (**Figura 10**) de 3.332 instal·lacions que pertanyen a la província de Tarragona.
4. Càlculs de la relació producció-instal·lació. En aquesta fase, les ubicacions dels panells fotovoltaics instal·lats han estat ajustats manualment, obtenint una capa SIG que es pot unir espacialment amb la base de dades cadastral.
5. Finalment, es crea un indicador a partir de la informació disponible, que es discuteix amb els propis enquestats per a valorar l'acceptació i possibles millors d'un indicador d'aquestes característiques.

Els procediments específics per calcular la radiació solar i el potencial d'instal·lació s'expliquen detalladament al 4.2. El procediment per calcular el potencial de generació d'electricitat s'explica detalladament al 4.4. La figura 4 mostra el flux de treball al llarg d'aquest procés.

Figura 9.

Pàgina d'inici de l'enquesta online enviada als ajuntaments de la demarcació de Tarragona.



El potencial solar fotovoltaic dels terrats dels edificis públics de la província de Tarragona

Els resultats del projecte «Determinació del potencial d'autoabastiment elèctric dels municipis de la demarcació de Tarragona a partir d'energia fotovoltaica i eòlica», finançat pels ajuts DIPTA-URV 2020-2023 i la Càtedra DOW/URV de Desenvolupament Sostenible, indiquen que la província de Tarragona té un potencial tècnic considerable per a la producció d'energia fotovoltaica mitjançant la instal·lació de panells solars als terrats dels edificis, que són espais ja alterats i que s'ajusten perfectament al model de transició energètica que pretén tant la Unió Europea com la Llei 16/2017 del Canvi Climàtic. En aquest context, seria benefícios que les entitats públiques—que són les encarregades de conduir les polítiques de transició energètica—prediquen amb l'exemple i facin visible la seva aposta per les energies renovables. Per a realitzar una bona estratègia per a la transició energètica ens cal comprendre quins factors afecten a l'aprofitament de la producció d'energia fotovoltaica als terrats. **Quins factors impulsen o frenen l'adopció d'aquestes solucions als edificis públics?**

Les dades que ens proporcioni en aquest formulari no s'utilitzaran de manera desagregada ni fora del marc d'aquesta recerca o, en tot cas, se li demanaria el seu consentiment informat per a un ús posterior de les dades.

Aquest qüestionari forma part del projecte: "El potencial solar fotovoltaic dels terrats dels edificis públics de la província de Tarragona: reptes per avançar cap a la Transició Energètica i expectatives dels agents implicats" que està finançat per la convocatòria de Projectes d'R+D+I DIPTA-URV i es desenvolupa entre el 01/04/2022 i el 31/12/2022.

...

* Obligatorio

Dades generals

1. Nom i cognoms *

2. E-mail *

3. Telèfon

Font: Elaboració pròpia.

Figura 10.

Exemple de relocalització manual d'instal·lacions fotovoltaiques sobre coberta a partir coordenades de la base de dades d'ICAEN.



Font: Elaboració pròpria.

4.1 Disponibilitat de dades

La disponibilitat de dades SIG públiques d'alta qualitat a Espanya i Catalunya és molt important per a la metodologia utilitzada en aquesta investigació. Es va utilitzar un Model Digital de Superfícies (MDS) de 5 m de resolució, derivat de dades LiDAR per calcular tots els passos del model de potencial solar (Böhner i Antonić, 2009). Les dades cadastrals son necessàries per seleccionar les superfícies disponibles de les cobertes. Aquest conjunt de dades conté alguns atributs rellevants, però els atributs finalment utilitzats han estat el nombre de plantes de cada part de l'edifici anterior i sota terra, estat (en desús, funcional, etc.), data de construcció, ús actual, data de digitalització. En total, hi havia 349.305 edificis, i 855.177 parts d'edifici (parts de cada edifici amb una volumetria diferent). La base de dades de Béns d'Interès Cultural (també conegut per les seves sigles BIC) és una figura jurídica de protecció del patrimoni històric espanyol. L'any 2017 hi havia 30.400 béns declarats en el registre, dels quals 382 es troben a la província de Tarragona. Finalment, una base de dades de l'ICAEN recull les ubicacions aproximades (punts) i algunes dades importants de les instal·lacions fotovoltaiques de Catalunya. Es van registrar un total de 8.229 instal·lacions entre el 2013 i el 2020. Per províncies Barcelona en té 5.764, Girona 1.234, Lleida 572 i Tarragona 659. Per a la cartografia es van utilitzar altres capes de referència SIG.

4.2 Modelat del potencial solar fotovoltaic

El potencial d'instal·lació d'energies renovables s'ha determinat a partir de l'elaboració de models físics i la definició d'un ús raonable del sòl, tenint en compte que el context socioeconòmic actual és favorable a una transició cap a l'adopció d'energies renovables de manera sostenible. El MDS de 5m de resolució s'ha utilitzat per calcular la radiació solar potencial. El *Centro Nacional de Información Geogràfica* (CNIG) distribueix aquest model per quadrícules en fitxers ESRI ASCII (.asc), segons els fulls del Mapa Topogràfic Nacional (MTN). S'ha escrit un script per a descarregar un total de 24 fulls que cobreixen tota la província de Tarragona i una àrea al voltant de +10 km—per introduir l'ombra de les muntanyes més properes de les zones frontereres. El resultat és un MDS de 3,4 GB en format Geopackage.

Els models desenvolupats durant les últimes dues dècades per calcular la radiació solar en entorns SIG normalment utilitzen la informació topogràfica continguda en un MDS per determinar índexs topogràfics com l'elevació, la orientació de superfície, i la projecció d'ombra (Böhner i Antonić, 2009). No obstant això, l'algorisme implementat a la SAGA GIS es basa en diferents enfocaments d'estimació. A més, l'aplicació per a MDS amb resolucions diferents sempre produueixen diferents valors al estimar índexs topogràfics (Raaflaub i Collins, 2006), que es nota especialment en zones amb una complexa geomorfologia. Per tant, aquests algorismes poden proporcionar diferents valors estimats de radiació solar. Finalment, augmentar la resolució del MDS és més exigent computacionalment. De manera que cal tenir en compte aquestes consideracions per a avaluar els costos de l'augment de la resolució.

En aquest treball s'ha utilitzat el programari de codi obert SAGA GIS, específicament el mòdul *Potential Incoming Solar Radiation*. SAGA GIS ofereix una àmplia varietat de paràmetres d'entrada per modelar la radiació solar potencial. La Radiació Directa és una funció de l'angle d'incidència dels raigs del sol, el flux solar a l'atmosfera superior, la transmitància atmosfèrica, l'angle d'il·luminació solar en la pendent i el factor de vista del cel (SVF) classifica les obstruccions resultants de l'*auto-ombreig* de la pròpia pendent o terreny adjacent (García et al., 2021). És important assenyalar que el SVF representa l'angle sòlid de l'hemisferi celeste visible normalitzat per l'angle sòlid de l'hemisferi celeste total, és a dir, només considera l'aspecte geomètric de la radiació disponible des del cel. No obstant això, el mètode proposat per Böhner i Antonić (2009) també proporciona una estimació de la radiació difusa.

Els diferents paràmetres es van aplicar amb les xifres mitjanes disponibles per a la província de Tarragona. Un cop s'han definit els paràmetres d'entrada, la major dificultat per al càlcul ve donada per les dimensions del MDS i la resolució temporal definida. Els passos intermedis i el model final es van calcular per separat en un ordinador Intel (R) Core (TM) i7-7800X CPU@3.50GHz amb 12 nuclis (24 fils de processament) i 32 GB de RAM. El temps total d'execució va ser de 13,7 hores. Els models finals resultants són els de la radiació difusa, la radiació directa i la radiació total (la suma dels dos capes anteriors), totes en kWh/m². Cadascun d'aquests models, segons la seva resolució i format, ocupa un espai de 3,4 GB.

4.3 Superfície de coberta disponible

Un cop obtingudes les radiacions de tota la província de Tarragona, es calculen les superfícies de coberta dels edificis disponibles per a instal·lar els panells fotovoltaics. Aquestes dades s'han descarregat massivament a través dels serveis de descàrrega ATOM del catàleg de la Infraestructura de dades Espacials d'Espanya (IDEE). Després de la càrrega de les dades, s'obté una base de dades que ocupa 1,3 GB de memòria que inclou tots els edificis, parts de l'edifici, parcel·les i també adreces postals de la demarcació (encara que aquesta última capa no és útil en el treball actual). En aquesta base de dades, s'elaboren una sèrie d'indicadors pel que fa a la forma (índex fractal i índex de forma; veure documentació del programari FRAGSTATS o Zaragozí et al., 2012), estructura vertical —relacions entre el nombre de pisos de cada part de l'edifici i la resta de sostres (per exemple, plantes mitjanes sobre el terra)—, i per a cada part d'edifici s'obté un polígon, la mitjana anual total de radiació solar es calcula a partir del model de radiació solar descrit en la subsecció anterior.

4.4 Càlcul de la producció potencial d'energia

Un cop s'han realitzat els càlculs per obtenir el potencial per a la instal·lació de panells fotovoltaics a les cobertes dels edificis que poden generar electricitat es poden obtenir utilitzant aquestes dades. Per al càlcul de la producció d'energia elèctrica mitjançant la instal·lació de panells fotovoltaics, i un cop calculat el total de radiació obtinguda a una resolució de 5 m per a tota la província de Tarragona, es calcula la mitjana anual que cada polígon identificat com a adequat, i per tant s'obté per cada part d'edifici el potencial de la radiació solar anual total (kWh/m²) que el conjunt de panells fotovoltaics rebria. Per a obtenir la producció d'electricitat (kWh) que podria ser generada pels panells fotovoltaics que es poden instal·lar en cada polígon, s'aplica un coeficient de reducció d'eficiència de les plaques (20%) i de les instal·lacions (80%) (Martin, A. M., 2016).

La fórmula resultant de l'aplicació de tots aquests criteris i procediments a través dels quals s'obté la producció de l'electricitat anual amb panells fotovoltaics és de com es detallada. L'**Equació 1** s'aplica llavors a totes les parts d'edificis. Després d'això, els resultats poden ser agregats per edificis o com sigui necessari.

Equació 1

$$E = ((A \cdot r) / p) \cdot a \cdot H \cdot PR$$

On:

E Energia (kWh)

A Àrea total del panell solar (m^2)

r Relació de la potència instal·lada per unitat d'àrea (66W/ m^2)

p Tipus de placa elèctrica. Per exemple, considerem un panell FV de 350W.

A Àrea d'un panell solar ($2m^2$).

H Radiació solar mitjana anual en panells inclinats. En el nostre estudi, lesombres s'inclouen a través de SVF.

PR Relació de rendiment o eficiència general. Es considera eficiència fotovoltaica (FVe) i eficiència de circuit (Ce).

Així, $0,2 \text{ FV e} \cdot 0,8 \text{ Ce} = 0,16 = 16\%$

5 RESULTATS

En aquest apartat es mostren els principals resultats de la recerca. En primer lloc, els resultats dels models calculats. En segon lloc, els resultats del qüestionari enviat als 184 ajuntaments de la demarcació de Tarragona i es mostra una proposta d'indicador sobre la posició de cada municipi en les fases d'adopció de la FV als terrats. Finalment, aquests resultats van ser discussits amb els assistents a la reunió de discussió dels realitzada el 15 de desembre de 2022. En aquesta reunió van assistir-hi 41 persones, entre alcaldes/ses, regidors/es i tècnics municipals, corresponents a 23 municipis de set comarques. També hi van participar cinc tècnics comarcals de les oficines de transició energètica.

Cal dir que, a petició dels tècnics comarcals de les oficines de transició energètica, en 2023 se'ls ha distribuït una versió més elaborada de la base de dades SIG amb els models de potencial i, el dia 25 de gener, es va realitzar un taller de caràcter tècnic se'ls va detallar millor les característiques dels models i l'ús que (amb precaucions) es pot fer d'aquestes dades.

5.1 Model de potencial tècnic calculat

A partir de la metodologia descrita en la secció anterior, s'han identificat un total de 6.136 ha de sostres d'edificis. A partir de la base de dades generada, s'han aplicat els següents criteris per elaborar una capa cadastral filtrant:

- Els edificis que es consideren no funcionals segons el Cadastre.
- Les parts que no pertanyen a un edifici (per exemple, els voltants, jardins, etc.).
- Els edificis que es van construir abans de 1.800.
- Edificis catalogats com a patrimoni (BIC).
- Les àrees centrals de les cobertes de menys de 10m², una vegada excloses les àrees mínimes legals que s'han de respectar per raons de seguretat i manteniment de les instal·lacions.
- Les àrees amb formes complexes. Per exemple, parts d'edificis amb línies fines o amb formes irregulars que fan difícil una instal·lació fotovoltaica (índex de forma no entre 1,1 i 4; índex de dimensió fractal més enllà de 1,9).
- Aquells edificis amb una radiació solar potencial mitjana de menys de 1.000 kWh/m².
- Patis i altres parts dels edificis que estan per sota de l'alçada mitjana de l'edifici, independentment de la radiació solar potencial estimada.

Figura 11.

(A) Resultats del calcul de potencial per a totes les cobertes. (B) Resultats exclent les cobertes que no resulten aptes pels criteris del model plantejat (cal recordar que son criteris que es poden modificar segons el context i que no cal seguir de manera estricta).



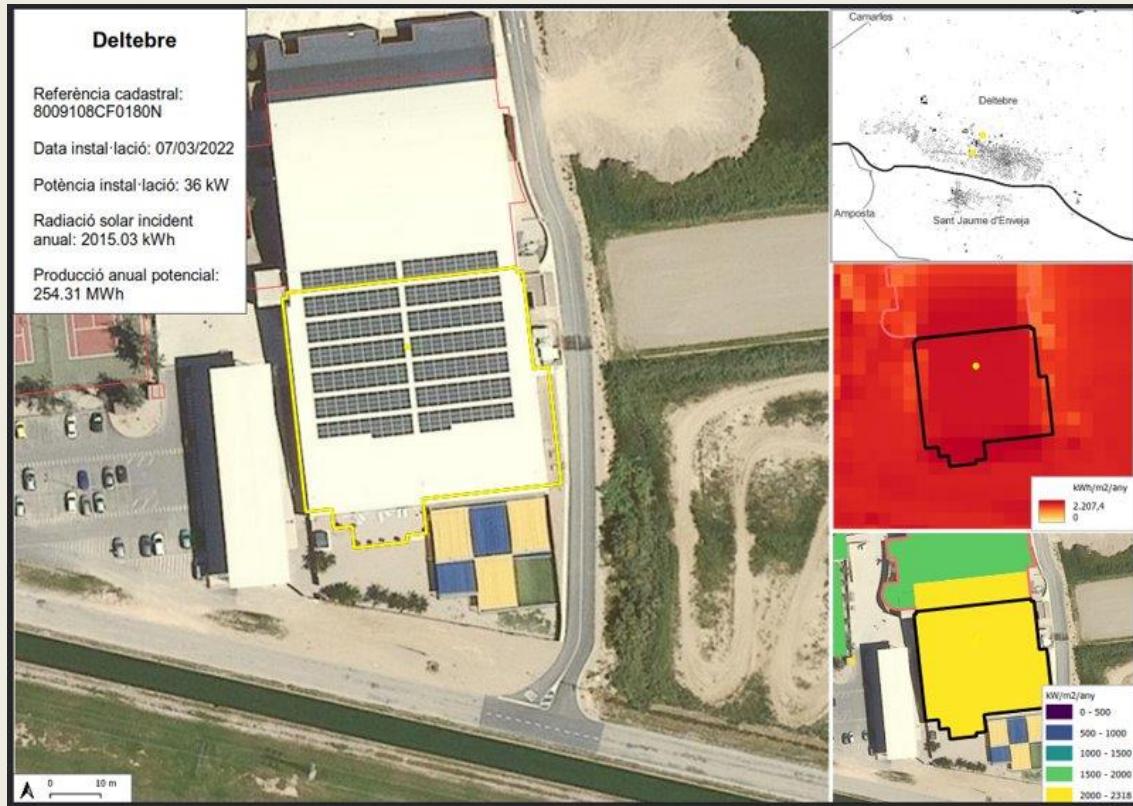
Font: Elaboració pròpia.

Tenint en compte aquests criteris, hi ha 2.993,5 hectàrees (48,74% del total d'edificis identificats). No obstant, al igual que succeeix amb els models físics de radiació solar, aquest procediment és sensible als paràmetres d'entrada, i hauríem de tenir en compte que és possible plantejar altres consideracions plausibles, o que és possible incorporar els nostres nous criteris per perfeccionar el resultats. Aquestes dades enllacen amb el projecte anteriorment anomenat (Saladié et al., 2022) i s'han elaborat només amb l'objectiu d'establir una discussió amb els agents del territori.

A partir d'aquestes dades, es van combinar les tres bases de dades –model de potencial, cadastre (amb indicador de l'ús principal “serveis públics”) i base de dades de localitzacions d'instal·lacions FV d'ICAEN actualitzada en octubre de 2022– per a tractar de fer un catàleg del potencial dels edificis emprats per serveis públics (gestionats pels consistoris o no). En la **Figura 12** es pot veure una fitxa d'exemple creuant les dades de les tres bases de dades i confirmant que el model proposat ofereix dades similars a les reals. Si bé no son dades de valor per als instal·ladors els models permetrien fer una primera jerarquizació del potencial dels edificis (veure Annex I per a més exemples de fitxes).

Figura 12.

Exemple de fitxa sobre el potencial FV d'un edifici públic.



Font: Elaboració pròpia. Cadastre i ICAEN.

5.2 Resultats quantitatius de l'enquesta enviada als ajuntaments

El qüestionari es va enviar per correu electrònic als 184 ajuntaments de la demarcació de Tarragona i als diversos tècnics de transició energètica de les deu comarques. Es van recollir respostes durant el mes de novembre de 2022.

En total, es van recollir respostes de 123 municipis, que representen el 66,8% del total de municipis de la demarcació de Tarragona (Taula 3 i Figura 13). Les comarques amb major número de respostes van ser el Baix Camp (85,7%), l'Alt Camp (78,3%), el Montsià (75%, i la Terra Alta (75%). Les comarques amb menor número de respostes municipals van ser el Priorat (47,8%), el Tarragonès (54,5%), el Baix Ebre (57,1%) i la Ribera d'Ebre (57,1%).

En relació a la població dels municipis amb resposta al qüestionari, hi hagut resposta de municipis que representen el 79,8% de la població de la demarcació de Tarragona (Taula 4). Les comarques amb més població representada han estat el Baix Camp (98,2%), la Conca de Barberà (92,1%), el Montsià (89,2%), i el Baix Ebre (87,1%). També es van recollir 9 respostes dels tècnics comarcals de transició energètica, de totes les comarques excepte la del Tarragonès.

Taula 3.

Nombre de municipis amb resposta al qüestionari. Per comarca.

Comarques	Nombre de municipis amb resposta	%
Alt Camp	18	78,3
Baix Camp	24	85,7
Baix Ebre	8	57,1
Baix Penedès	10	71,4
Conca de Barberà	14	63,6
Montsià	9	75,0
Priorat	11	47,8
Ribera d'Ebre	8	57,1
Tarragonès	12	54,5
Terra Alta	9	75,0
Total	123	66,8

Font: Elaboració pròpia

Taula 4.

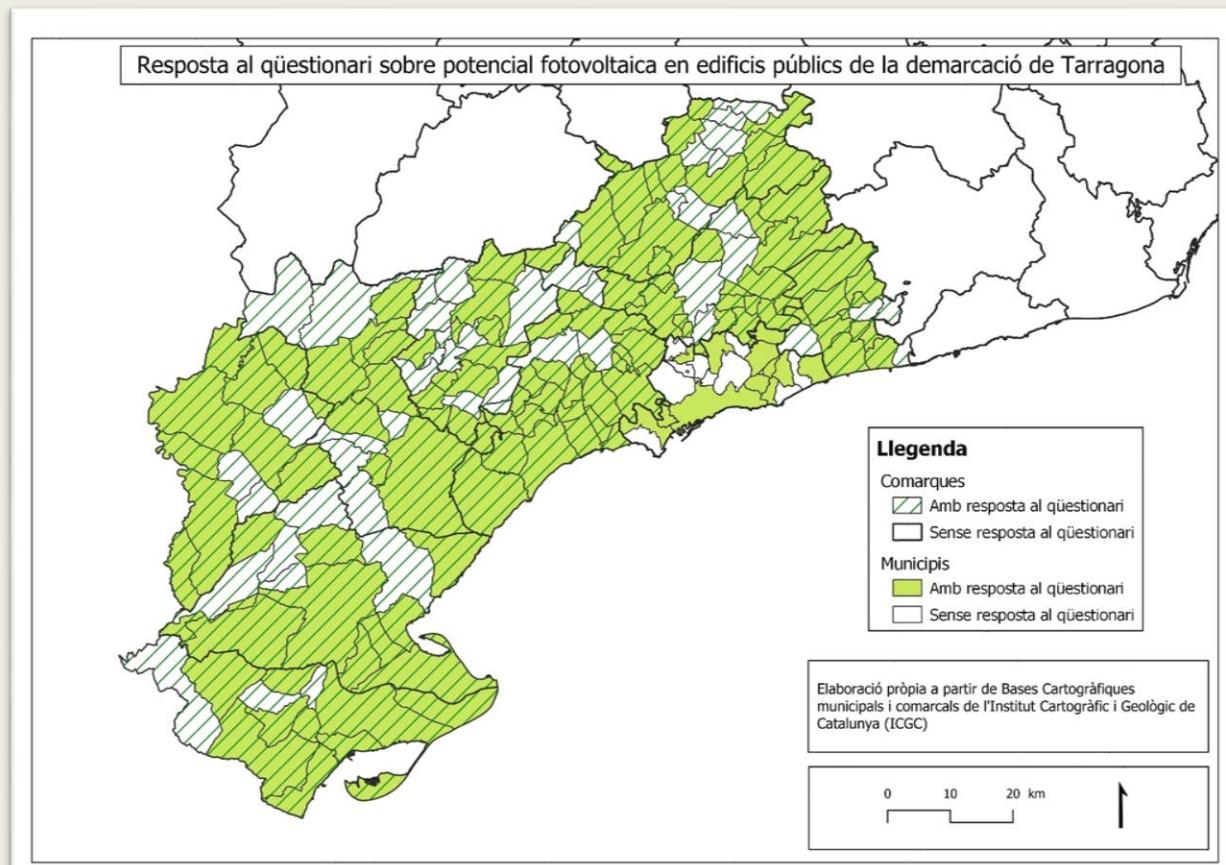
Població de municipis amb resposta al qüestionari, per comarca.

Comarques	Població municipis amb resposta	%
Alt Camp	14.727	32,7
Baix Camp	191.616	98,2
Baix Ebre	68.528	87,1
Baix Penedès	86.726	78,5
Conca de Barberà	18.514	92,1
Montsià	61.035	89,2
Priorat	5.741	62,1
Ribera d'Ebre	11.516	52,7
Tarragonès	188.344	71,9
Terra Alta	9.668	84,8
Total	656.415	79,8

Font: Elaboració pròpia.

Figura 13.

Resposta al qüestionari sobre potencial FV en edificis públics de la demarcació de Tarragona.



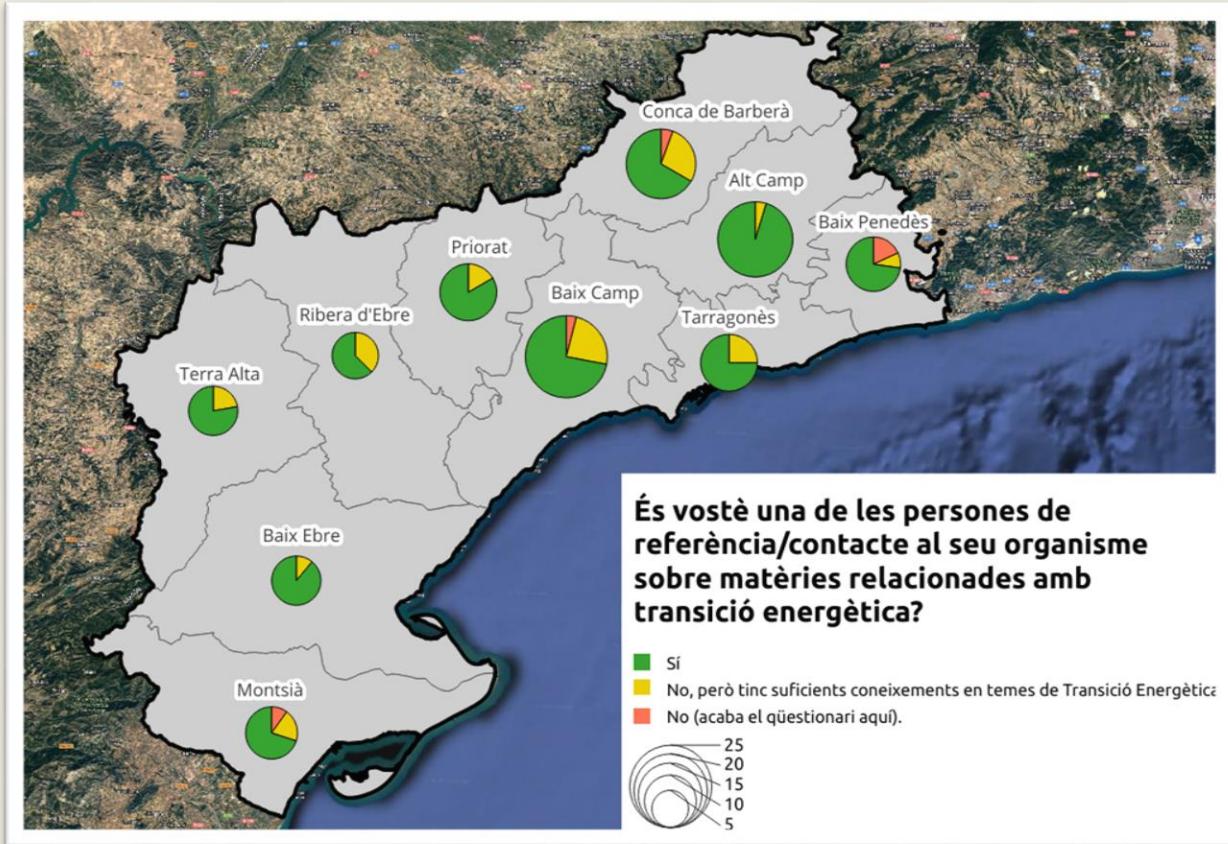
Font: Elaboració pròpria.

5.3 Resultats qualitatius de l'enquesta

La majoria de respostes als qüestionaris les van realitzar membres dels ajuntaments que majoritàriament es consideraven les persones de referència sobre matèries relacionades amb la transició energètica, i que afirmaven tenir un grau de coneixement mitjà i alt en aquesta temàtica (**Figura 14**). A continuació es presenten algunes de les qüestions més rellevants extretes de les respostes al qüestionari.

Figura 14.

Respostes a la pregunta número 7 del qüestionari.

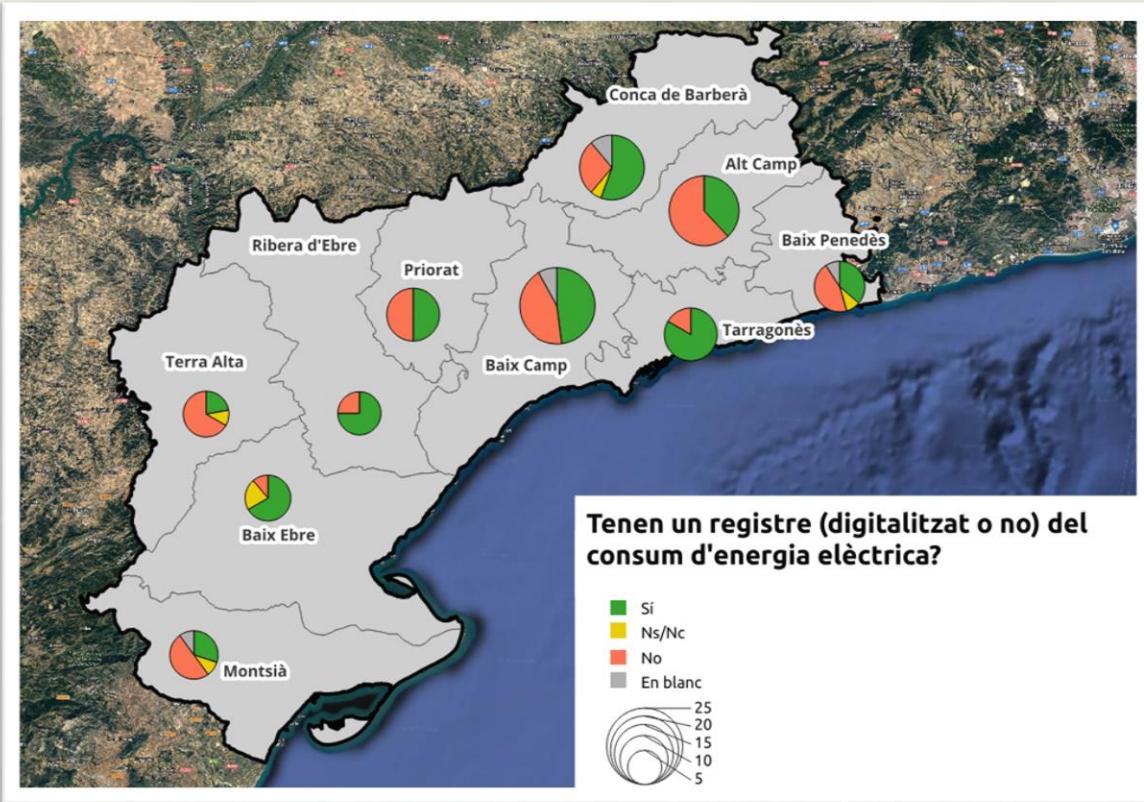


Font: Elaboració pròpia a partir del qüestionari.

La majoria de municipis de la demarcació (67) tenen un registre del consum d'energia elèctrica, tot i que 48 afirmen no disposar-ne. Les comarques del Baix Ebre, la Ribera d'Ebre, el Tarragonès i la Conca de Barberà tenen més de la meitat de municipis amb el consum elèctric registrat (**Figura 15**).

Figura 15.

Respostes a la pregunta número 7 del qüestionari agrupada per comarques.



La majoria de municipis de la demarcació (94) tenen contractat el subministrament d'electricitat amb ENDESA (**Figura 16**).

Figura 16.

Respostes a la pregunta número 14 del qüestionari.



Font: Elaboració pròpia

La majoria de municipis de la demarcació de Tarragona afirmem no disposar de subministrament elèctric 100% renovable (**Figura 17**).

Figura 17.

Respostes a la pregunta número 16 del qüestionari.

El contracte de subministrament al seu ajuntament/organisme és amb electricitat d'origen 100% renovable?

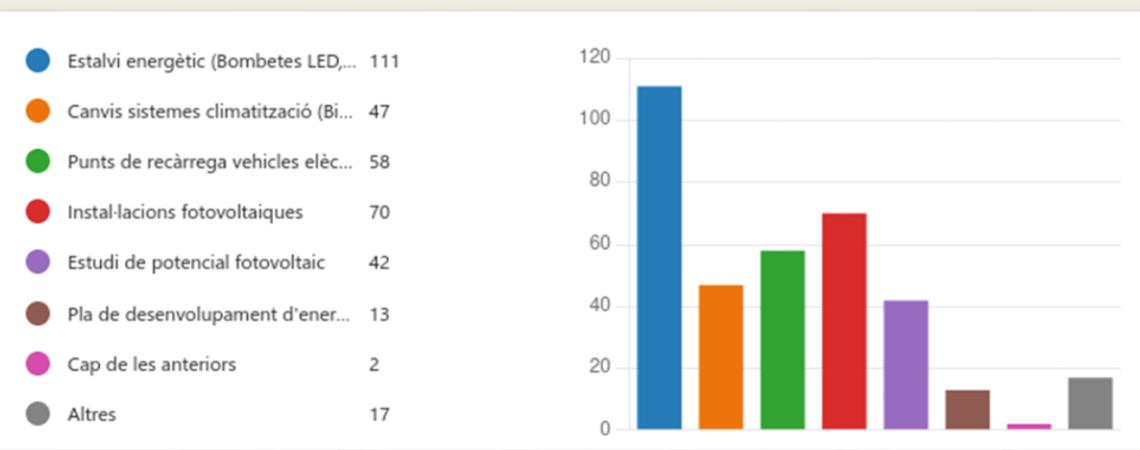


Font: Elaboració pròpia

A la pregunta si els municipis ja han realitzat alguna actuació en matèria de transició energètica o d'adaptació al canvi climàtic, 111 municipis afirmen haver emprès mesures d'estalvi energètic, 70 haver realitzat instal·lacions fotovoltaïques, 58 punts de recàrrega de vehicles elèctrics, 47 canvis en els sistemes de climatització i 42 estudis de potencial fotovoltaic (**Figura 18**).

Figura 18.

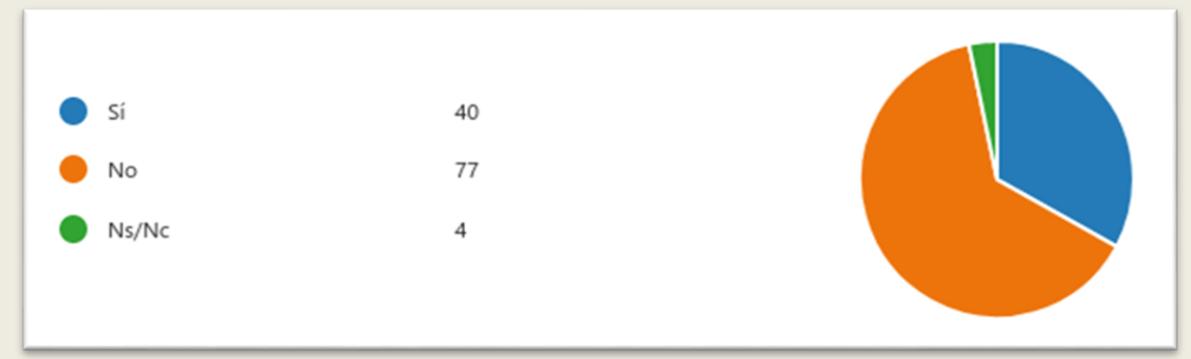
Respostes a la pregunta número 17 del qüestionari



Font: Elaboració pròpia

La majoria d'ajuntaments de la demarcació de Tarragona (77) afirmen no tenir ordenances específiques sobre instal·lacions fotovoltaïques (**Figura 19**).

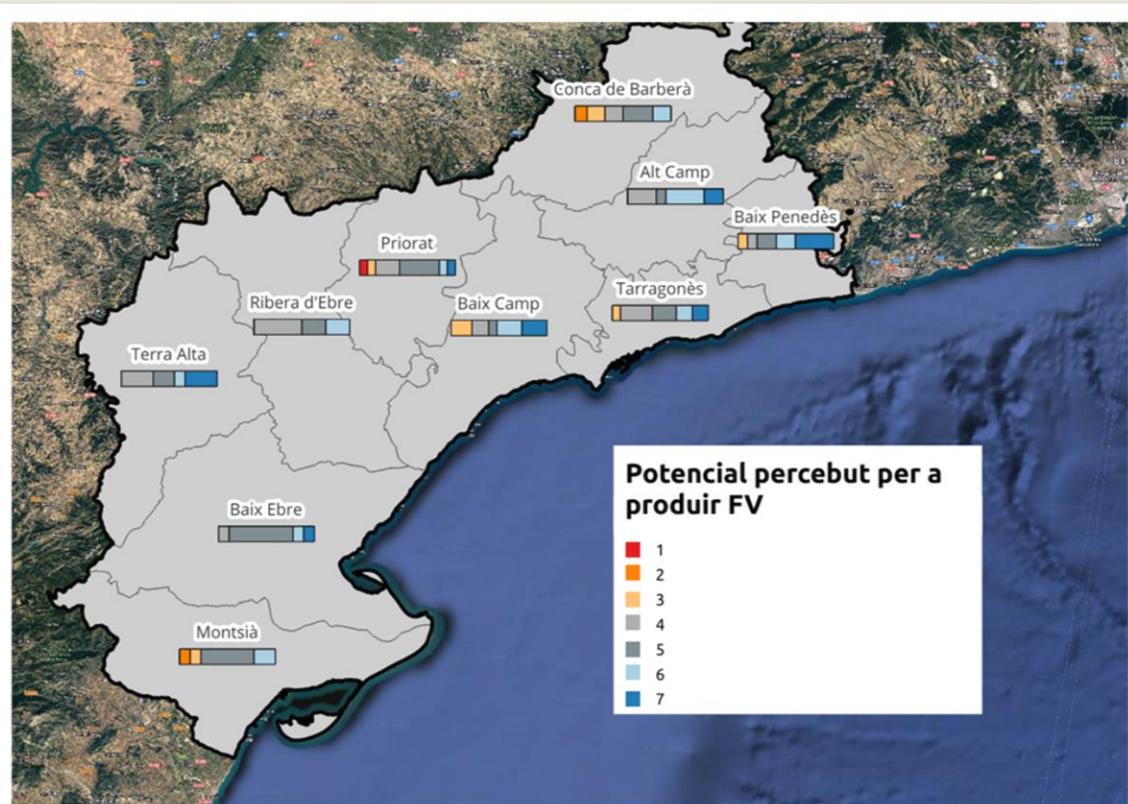
Figura 19.
Respostes a la pregunta número 19 del qüestionari



Font: Elaboració pròpia

La majoria municipis de la demarcació consideren que el seu municipi té un potencial mitjà-alt per a l'autoabastiment a partir d'energia solar FV instal·lada a les cobertes dels edificis públics (**Figura 20**).

Figura 20.
Respostes a la pregunta número 25 del qüestionari agrupada per comarques

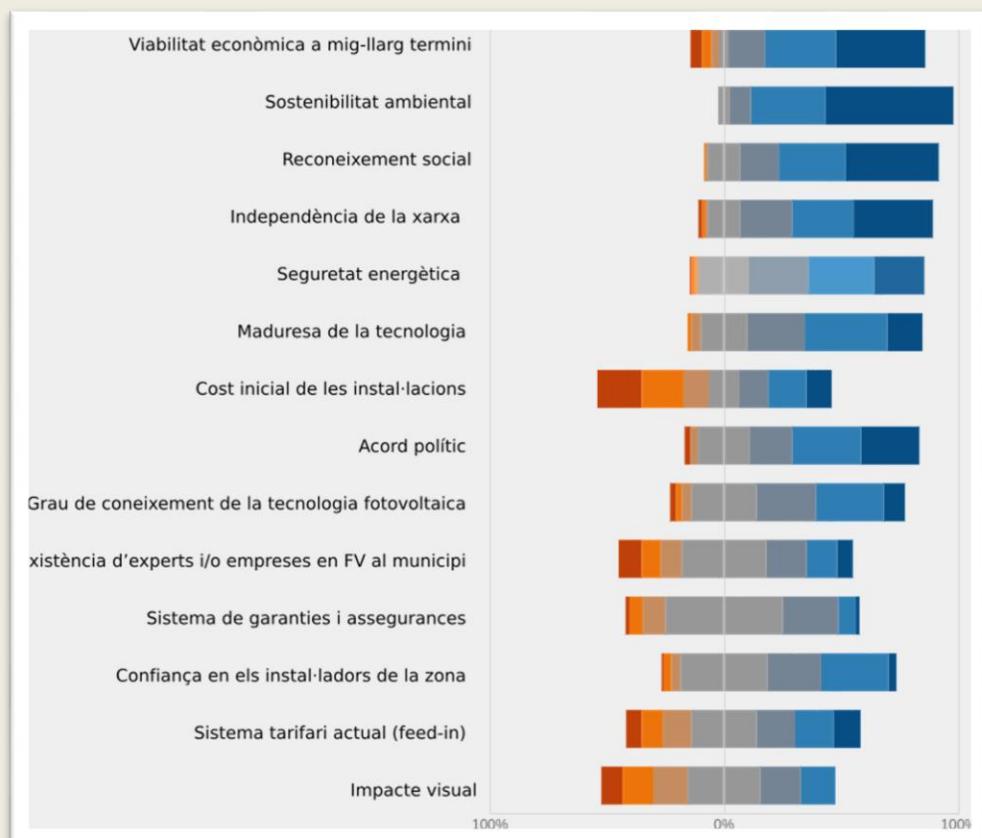


Font: Elaboració pròpia

Una vegada revisades les preguntes d'un caràcter més objectiu, també s'han revisat els aspectes que els enquestats consideren com a elements facilitadors per prendre decisions d'instal·lar FV. Als factors considerats predominantment com a facilitadors hi ha la sostenibilitat ambiental, el reconeixement social, la viabilitat econòmica, la independència de la xarxa, la seguretat energètica, la maduresa de la tecnologia, l'acord polític, la confiança en els instal·ladors de la zona, l'existència d'ajuts d'altres administracions, l'estalvi en la factura elèctrica, o la imatge del municipi. Per contra, entre els elements que es consideren barreres hi ha el cost inicial de les instal·lacions, la inexistència d'experts i/o empreses en FV al municipi, l'impacte visual, els sistema de garanties i assegurances, el sistema tarifari actual, el marc regulador i/o normatiu, la compatibilitat amb les prioritats d'inversió, els temps per informar-se i realitzar la instal·lació, l'existència d'edificis amb valor patrimonial, les característiques de les cobertes dels edificis disponibles, el funcionament i manteniment de les instal·lacions FV, els tràmits administratius, o els problemes inesperats (**Figures 21, 22 i 23**). No obstant, aquesta interpretació general, cal dir que les respostes varien per comarques i també per municipis.

Figura 21.

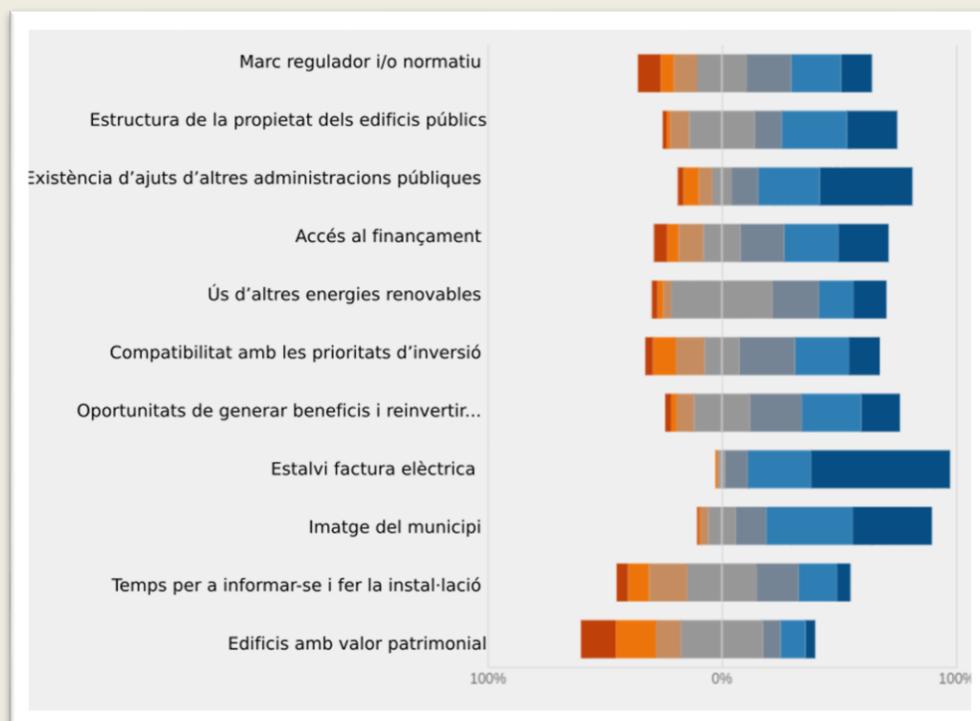
Respostes a la pregunta sobre barreres o facilitadors per a la instal·lació de FV



Font: Elaboració pròpia a partir del qüestionari.

Figura 22.

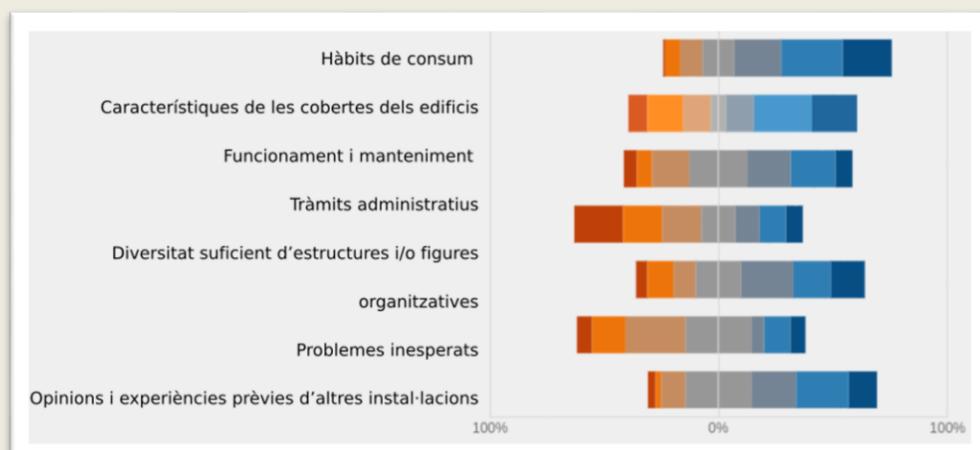
Respostes a la pregunta sobre barreres o facilitadors per a la instal·lació de FV



Font: Elaboració pròpia a partir del qüestionari.

Figura 23.

Respostes a la pregunta sobre barreres o facilitadors per a la instal·lació de FV

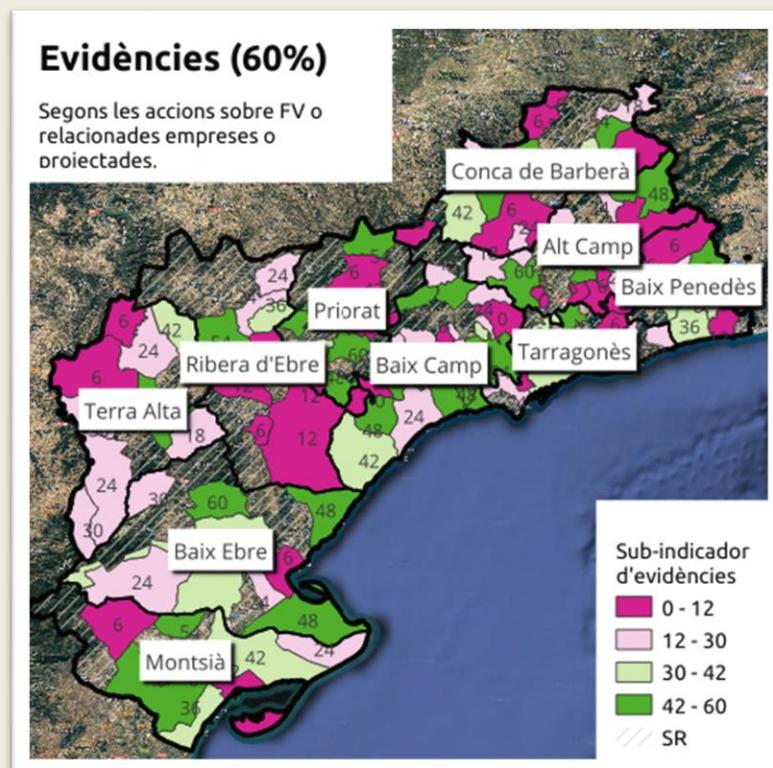
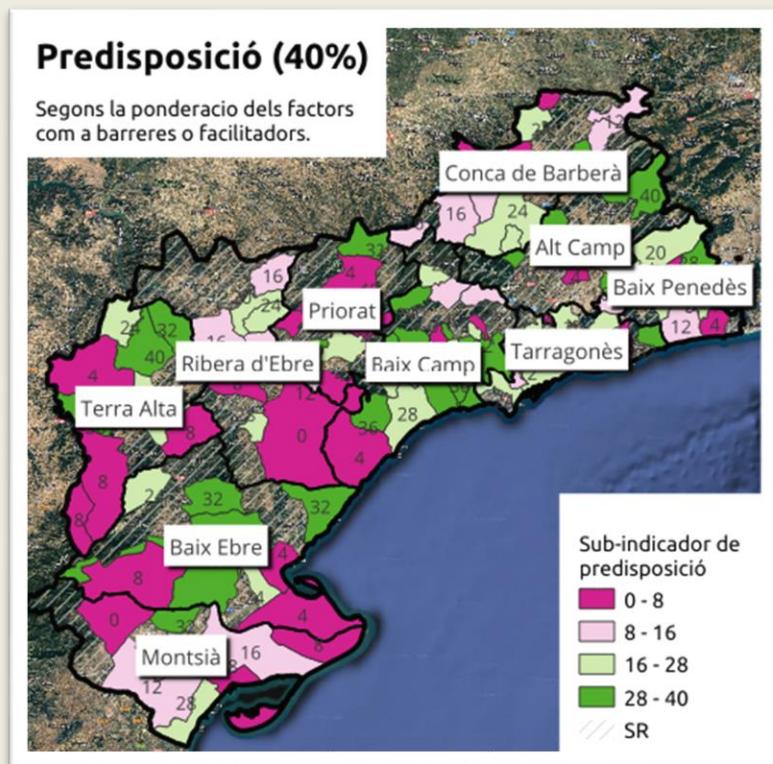


Font: Elaboració pròpia a partir del qüestionari.

A partir de la informació recollida al qüestionari s'han elaborat dos senzills indicadors a base de ponderar les preguntes de l'enquesta segons si aquestes feien referència a la (1) predisposició dels municipis per adoptar FV (sensibilitat ambiental, grau de compatibilitat, percepció del propi potencial, predominança barreres/facilitadors, etc), o (2) d'acord amb el nombre d'evidències explicades en les respostes (existència de regulacions específiques, grau de coneixement, exemples d'instal·lacions prèvies o nombre de projecte realitzats o en fase de disseny, etc). En aquest cas l'indicador es mostra a escala municipal, tenint en compte que alguns municipis tingueren només una resposta mentre que altres en tingueren varies i aquí es pren la mitja dels valors (**Figura 24**).

Figura 24.

Indicadors de predisposició i evidències



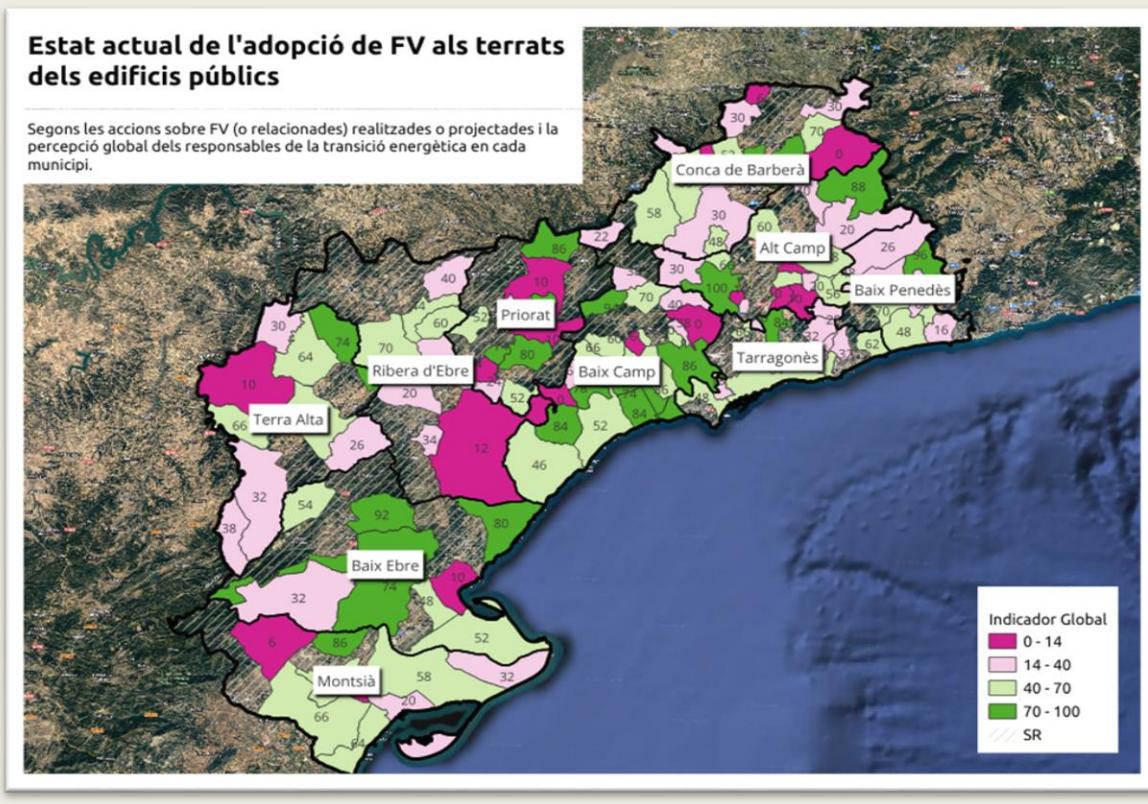
Font: Elaboració pròpia

En un següent pas, els dos sub-indicadors es combinen en un únic indicador global per a poder-lo discutir amb els propis enquestats. Finalment, un total de 41 persones, entre alcaldes/sses, regidors/es i tècnics municipals, corresponents a 23 municipis de set comarques, i cinc tècnics comarcals de les oficines de transició energètica, van participar en la sessió del 15 de desembre i van aportar el seu punt de vista. Tot i no comptar amb representants del total de participants al qüestionari, els assistents a la sessió van manifestar estar majorment o parcialment d'acord amb la representació del seu municipi en el mapa de la **Figura 25**. Alguns dels assistents demanaren matissar la representació en el mapa, probablement per considerar que la persona (o les persones) a qui va arribar l'enquesta no estava del tot informada de les accions iniciades o desenvolupades al municipi, o també es podia tractar de iniciatives concretades *a posteriori* de la realització del qüestionari.

En una altra part de la mateixa reunió s'explicaven les diferents variables i criteris que calen per calcular el potencial FV i com en moltes ocasions aquests aspectes s'hauran d'ajustar a nivell local.

Figura 25.

Indicador global sobre l'estat actual de l'adopció de FV al terrats dels edificis públics dels municipis de la demarcació de Tarragona



Font: Elaboració pròpia

6 DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS

En aquest document presentem una metodologia oberta que es podrà millorar per analitzar la voluntat públic-privada d'adoptar FV a les cobertes dels edificis. Els punts forts de l'aproximació són:

1. La seva reproduïibilitat però que també és extensible amb noves eines, metodologies o dades (Gassar i Cha, 2021; Freitas et al., 2015);
2. La creació de models específics de construcció de potencial tècnic fotovoltaic, permetent adaptar-lo a diferents escales, resolucions (espacial i temporal) i limitacions. Per exemple, podríem decidir no excloure dels anàlisis les parts d'edifici dels edificis patrimonials (Lucchi et al., 2022). És interessant que un dels edificis de servei públic que s'hauria exclòs en aquest estudi era una església, però hi pot haver parts d'aquests edificis on la instal·lació de FV seria tècnicament i estèticament acceptable (oficines, casa del rector, etc).
3. La base de dades d'instal·lacions fotovoltaiques ha estat útil tot i no estar més actualitzada, això concorda amb diversos autors que consideren que la manca d'aquestes dades és un tema clau en els estudis actuals i futurs de Transició Energètica (Kruitwagen et al., 2021; Stowell et al., 2020). A més, la base de dades de localitzacions d'instal·lacions FV d'ICAEN no compta amb una georeferenciació acurada sinó que es tracta d'una aproximació –potser també amb implicacions de privacitat de dades– i la seva revisió resulta costosa. Finalment, el nombre d'edificis públics amb instal·lacions ja existents reportats en el qüestionari realitzat als ajuntaments ja és molt major del que s'ha pogut detectar amb les bases de dades disponibles de manera pública i oberta.
4. A partir de mètodes qualitatius, s'ha comprovat la alta motivació dels responsables d'ens públics, com els ajuntaments, per adoptar aquestes noves tecnologies, tot i ser conscients de les barreres que aquestes tecnologies encara poden presentar.

Per tant, l'estudi actual contribueix significativament a reduir les mancances de coneixement esmentades en el revisió de literatura (secció 2.4) i és un pas important cap a l'operativització de les tendències d'adopció de FV d'altres dades que no siguin qualitatives. Per a garantir una aplicació satisfactòria de la metodologia presentada, hem de debatre diversos punts crítics del nostre esforç amb les troballes rellevants de la literatura. Cal tenir en compte aquests punts crítics abans d'aplicar l'aproximació, per exemple, en l'ordenació del territori.

En primer lloc, la metodologia per al càcul del potencial FV és reproduïble però computacionalment exigent. Això seria un problema si fos necessari avaluar un altre

resolució temporal o espacial, per exemple, modelar el potencial per estacions, mesos, estacions, setmanes o fins i tot intentant entendre els patrons horaris. A més, com es veu a la revisió literària, quan s'utilitza un MDS derivat de LiDAR s'han de considerar algunes precaucions derivades. Per exemple, una resolució de 5m no és suficient per a petits edificis i la vegetació que envolta un edifici baix podria canviar en un temps molt curt. A més, la base de dades del Cadastre s'actualitza cada pocs anys. Això faria necessari periòdicament recrear els models. Per aquesta raó, considerem que proporcionar mètodes reproduïbles (amb SIG lliure) és primordial en aquest tipus d'estudis.

En segon lloc, l'aproximació assumeix que la tecnologia FV és estàtica (potencial tècnic). El potencial energètic està basat en les actuals limitacions tecnològiques per a la tecnologia fotovoltaica solar (com l'eficiència, l'espai requerit, etc.). No obstant això, molts estudis han identificat una innovació tecnològica considerable en el camp en períodes de temps relativament curts (Pang et al., 2020). Una autoavaluació entre experts en tecnologia ens va aproximar a uns valors del 20 al 25% d'eficiència per a la fotovoltaica, i el potencial per utilitzar fotovoltaica en façanes a causa de nous materials. En conseqüència, la nostra avaluació energètica és una estimació bastant conservadora. Fins i tot, alguns autors com Kutlu et al. (2022) informen de les avantatges de cèl·lules bifacials per augmentar significativament l'eficiència. **Aquestes qüestions no son desconeigudes per als experts dels ajuntaments i oficines comarcals consultats durant aquest estudi.**

En tercer lloc, la nostra anàlisi va utilitzar una base de dades no actualitzada (no completa) amb instal·lacions fotovoltaiques per al període 2013-2022. No obstant això, gràcies a les fotointerpretacions de les ortofotos del WMS de 2022 i a la informació proporcionada pels tècnics dels municipis de la demarcació, sens dubte sabem que desenes d'instal·lacions solars FV molt properes a les llistades a la base de dades no es van considerar. Això podria ser per diferents raons però també és possible que el boom d'adopció de la FV dels últims dos anys pugui explicar la major part de les inconsistències de la base de dades.

En quart lloc, els nostres càlculs de producció d'energia potencial es basen en algunes simplificacions de la realitat. Per exemple, rebutgem edificis i parts de l'anàlisi per diferents raons (és a dir, edificis patrimonials, formes complexes, àrees petites), però es va trobar que alguns d'aquests edificis estaven, de fet, instal·lats amb solar FV, així que s'han de revisar els criteris per a futures evaluacions. Aquest tipus de decisions podrien alterar significativament l'assignació de superfícies de producció d'energia renovable tal com es va informar en altres estudis de canvi d'ús del sòl (Price et al., 2015). Els tècnics i experts consultats en aquest estudi han manifestat diferencies de criteris, fins i tot en municipis molt propers en l'espai. Si bé han trobat

interessant comptar amb un mapa solar, es considera que les últimes decisions s'han de prendre a partir d'un major coneixement del territori. **D'aquesta manera s'ha considerat positiu l'interès per part dels tècnics de les oficines comarcals de TE en consultar directament les dades i veure com aprofitar aquesta informació per generar models propis i més adequats als requeriments locals.**

En cinquè lloc, la nostra avaluació és bastant conservadora quant a la coexistència d'altres usos i la producció d'energia, la qual cosa podria donar lloc a una subestimació de la quantitat total d'energia. Això és raonable des del punt de vista científic. La literatura demostra que l'ús òptim mixt d'àrees de teulada encara no està ben definit. Per exemple, la FV podria necessitar cohabitar amb sostres verds, sostres freds, alimentació i altres usos (Cavadini i Cook, 2021; Sattler et al., 2020), però en altres edificis la solar FV no podria ni instal·lar-se per diferents raons.

Sisè, el modelatge de FV és difícil, no només físicament, sinó també moltes variables socioeconòmiques i legals poden participar. Ignorar aquestes barreres locals podria fins i tot generar conflictes no desitjats, com s'explica en l'apartat 2.1. Per a per aquesta raó, els informes tècnics i els mapes potencials fotovoltaics haurien de presentar-se de manera útil (comerciants, reunions) o a través d'informats a parells.

Seria beneficiós que les administracions públiques – que són les responsables finals de promoure les polítiques de bona Transició Energètica – són un exemple en fer més visible el seu compromís amb les energies renovables. Curtius et al. (2018) va explicar que els efectes de parells podrien ser una eina important en la promoció de l'adopció de solar FV. Això podria ser més eficaç que oferir subvencions generals als adoptants i les autoritats també podrien adonar-se de les barreres per a l'adopció. L'enfocament proposat té diverses limitacions, però de fet existeix la necessitat de saber si els edificis de serveis públics podria generar fins i tot més electricitat i compartir-la amb ciutadans amb ingressos més baixos o fins i tot generar beneficis. Un cop les barreres i els facilitadors són ben coneguts, els edificis públics podrien ser un lloc per a resoldre els dubtes i impulsar la confiança en el potencial FV de potencials adoptants (Qureshi et al., 2017).

Tenint en compte les llacunes de coneixement identificades en aquest article i basades en els resultats obtinguts, creiem que caldria analitzar la fase de la Transició Energètica en la qual es troben les entitats públiques de la província de Tarragona. En primer lloc, caldria determinar si els administradors dels edificis públics (és a dir, ajuntaments, biblioteques, escoles, centres esportius, cementiris) són conscients del potencial de producció d'energia fotovoltaica en les seves cobertes. En segon lloc, el propi procés d'enquesta ens permetrà difondre informació sobre el potencial energètic d'aquests espais i fomentar-los el debat social. Basant-se en les metodologies i

resultats d'aquesta investigació, una sèrie de nous escenaris amb diferents paràmetres s'han de modelar per ajudar-nos a definir robustament quines són les cobertes dels edificis públics de la província amb el major potencial fotovoltaic, o fins i tot quins edificis es col·loquen en un espai central perquè l'avanç tecnològic pugui ser més observable. Amb aquesta informació es podria realitzar una transferència d'educació i recerca mediambiental. En aquest procés es podria enquestar als administradors dels edificis de serveis públics amb major potencial per esbrinar: a) quines mesures s'han pres per a la instal·lació d'aquest tipus d'instal·lacions; b) si no s'ha considerat la instal·lació de FV fins ara; c) quines barreres es trobaven en el procés; o d) si conèixer el potencial de generació faria estudiar aquesta qüestió més de prop en un futur pròxim.

Paral·lelament, estem d'acord amb altres investigadors que haurien de ser disponibles bases de dades i models més precisos i complets, sense importar quins mètodes s'utilitzen per preparar-los, a partir de fotointerpretació, teledetecció tradicional i SIG, deep-learning o fins i tot treball de camp.

Finalment, també demanem un compromís més ferm amb polítiques més distribuïdes i d'estalvi energètic que redueixin impactes ambientals i socioeconòmics directes, com ara eficiència energètica, autoconsum i millora de l'eficiència energètica en edificis.

Els pobles i les ciutats seran escenaris clau per a la Transició Energètica. A Espanya, la llei del 2019 ha reprès el camí de promoure l'adopció de noves tecnologies fotovoltaiques i ho fa reduint les incerteses del període anterior.

Els resultats d'aquesta recerca suggerixen que la FV tindrà un paper important, però s'haurà d'ordenar el procés per evitar crear falses expectatives. Hi haurà nombroses superfícies de cobertes que no estaran ocupades per panells solars, almenys al principi. Encara existeixen buits tècnics i falten dades per a poder avaluar les principals qüestions de la Transició Energètica. La nostra principal contribució és proporcionar noves evidències per entendre com s'està formalitzant la Transició Energètica. El debat públic és necessari per a evitar errors de passades transicions energètiques, garantint la sostenibilitat, l'equitat i la racionalitat en el procés.

El nostre públic objectiu inclou autoritats nacionals i gestors regionals i locals de terres que poden utilitzar l'enfocament (1) per formar estratègicament la seva Transició Energètica amb un mínim impacte paisatgístic, (2) dissenyar territorial i sectorialment plans a nivell regional, i (3) iniciar un diàleg amb la població afectada mitjançant l'ús de totes les dades disponibles en un context operatiu, com tallers amb agents del territori o l'organització d'experiències de *triabilitat* i observabilitat d'experiències.

Figura 26.

Estat de la qüestió en la implementació de FV en els sostres dels edificis municipals de la demarcació de Tarragona

	Alt nivell d'activitat	Baix nivell d'activitat
Alta predisposició	<p><i>No baixar la guàrdia i continuar avaluant alternatives.</i></p> <p><i>Cal estar participatius i ajudar els altres municipis a prendre decisions.</i></p>	<p><i>Cal revisar les barreres que realment impedeixen emprendre accions.</i></p> <p><i>Buscar solucions en les experiències pròximes de municipis similars.</i></p>
Baixa predisposició	<p><i>S'ha de revisar el discurs propi sobre la instal·lació de FV per a l'autoconsum.</i></p> <p><i>La realitat indica que s'està fent una feina positiva implantant FV al municipi.</i></p>	<p><i>Les experiències dels altres municipis demostren que és possible adoptar FV si es realitzen determinades accions.</i></p> <p><i>No descartar la possibilitat i <u>continuar recollint informació</u> que ens ajudi a decidir.</i></p>

Font: Elaboració pròpia.

7 BIBLIOGRAFIA

- Alipour, M., Salim, H., Stewart, R.A., Sahin, O., 2020. Predictors, taxonomy of predictors, and correlations of predictors with the decision behaviour of residential solar photovoltaics adoption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 123, 109749. doi:10.1016/j.rser.2020.109749.
- Bódis, K., Kougiás, I., Jäger-Waldau, A., Taylor, N., Szabó, S., 2019. A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 114, 109309. doi:10.1016/j.rser.2019.109309.
- Böhner, J., Antonić, O., 2009. Chapter 8 Land-Surface Parameters Specific to Topo-Climatology, in: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), *Developments in Soil Science*. Elsevier. volume 33 of *Geomorphometry*, pp. 195–226. doi:10.1016/S0166-2481(08)00008-1.
- Bright, J.M., Killinger, S., Lingfors, D., Engerer, N.A., 2018. Improved satellite-derived PV power nowcasting using real-time power data from reference PV systems. *Solar Energy* 168, 118–139. doi:10.1016/j.solener.2017.10.091.
- Brudermann, T., Reinsberger, K., Orthofer, A., Kislinger, M., Posch, A., 2013. Photovoltaics in agriculture: A case study on decision making of farmers. *Energy Policy* 61, 96–103. doi:10.1016/j.enpol.2013.06.081.
- Cavadini, G.B., Cook, L.M., 2021. Green and cool roof choices integrated into rooftop solar energy modelling. *Applied Energy* 296, 117082. doi:10.1016/j.apenergy.2021.117082.
- Chen, Z., Jiang, M., Qi, L., Wei, W., Yu, Z., Wei, W., Yu, X., Yan, J., 2022. Using existing infrastructures of high-speed railways for photovoltaic electricity generation. *Resources, Conservation and Recycling* 178, 106091. doi:10.1016/j.resconrec.2021.106091.
- Curtius, H.C., Hille, S.L., Berger, C., Hahnel, U.J.J., Wüstenhagen, R., 2018. Shotgun or snowball approach? Accelerating the diffusion of rooftop solar photovoltaics through peer effects and social norms. *Energy Policy* 118, 596–602. doi:10.1016/j.enpol.2018.04.005.
- Field, A., 2017. *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. Fifth Edition. volume 1.
- Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., Brito, M.C., 2015. Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 915–931. doi:10.1016/j.rser.2014.08.060.
- Gagnon, P., Margolis, R., Melius, J., Phillips, C., Elmore, R., 2018. Estimating rooftop solar technical potential across the US using a combination of GIS-based methods, lidar data, and statistical modeling. *Environmental Research Letters* 13, 024027. doi:10.1088/1748-9326/aaa554.
- García, I., de Blas, M., Hernández, B., Sáenz, C., Torres, J.L., 2021. Diffuse irradiance on tilted planes in urban environments: Evaluation of models modified with sky and

- circumsolar view factors. *Renewable Energy* 180, 1194–1209. doi:10.1016/j.renene.2021.08.042.
- Gassar, A.A.A., Cha, S.H., 2021. Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales. *Applied Energy* 291, 116817. doi:10.1016/j.apenergy.2021.116817.
- Gooding, J., Crook, R., Tomlin, A.S., 2015. Modelling of roof geometries from low-resolution LiDAR data for city-scale solar energy applications using a neighbouring buildings method. *Applied Energy* 148, 93–104. doi:10.1016/j.apenergy.2015.03.013.
- Hao, D., Qi, L., Tairab, A.M., Ahmed, A., Azam, A., Luo, D., Pan, Y., Zhang, Z., Yan, J., 2022. Solar energy harvesting technologies for PV self-powered applications: A comprehensive review. *Renewable Energy* 188, 678–697. doi:10.1016/j.renene.2022.02.066.
- Huld, T., 2017. PVMAPS: Software tools and data for the estimation of solar radiation and photovoltaic module performance over large geographical areas. *Solar Energy* 142, 171–181. doi:10.1016/j.solener.2016.12.014.
- Julietta, S.R., José-Julio, R.B., Pablo, Y.R., 2022. A methodology to estimate the photovoltaic potential on parking spaces and water deposits. The case of the Canary Islands. *Renewable Energy* 189, 1046–1062. doi:10.1016/j.renene.2022.02.103.
- Kienast, F., Huber, N., Hergert, R., Bolliger, J., Moran, L.S., Hersperger, A.M., 2017. Conflicts between decentralized renewable electricity production and landscape services – A spatially-explicit quantitative assessment for Switzerland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 397–407. doi:10.1016/j.rser.2016.09.045.
- Kruitwagen, L., Story, K.T., Friedrich, J., Byers, L., Skillman, S., Hepburn, C., 2021. A global inventory of photovoltaic solar energy generating units. *Nature* 598, 604–610. doi:10.1038/s41586-021-03957-7.
- Kutlu, E.C., Durusoy, B., Ozden, T., Akinoglu, B.G., 2022. Technical potential of rooftop solar photovoltaic for Ankara. *Renewable Energy* 185, 779–789. doi:10.1016/j.renene.2021.12.079.
- Li, P., Zhang, H., Guo, Z., Lyu, S., Chen, J., Li,W., Song, X., Shibasaki, R., Yan, J., 2021. Understanding rooftop PV panel semantic segmentation of satellite and aerial images for better using machine learning. *Advances in Applied Energy* 4, 100057. doi:10.1016/j.adapen.2021.100057.
- López Prol, J., Steininger, K.W., 2020. Photovoltaic self-consumption is now profitable in Spain: Effects of the new regulation on prosumers' internal rate of return. *Energy Policy* 146, 111793. doi:10.1016/j.enpol.2020.111793.
- Lucchi, E., Dall'Orto, I., Peluchetti, A., Toledo, L., Pelle, M., Polo López, C., Guazzi, G., 2022. Photovoltaic technologies in historic buildings and protected areas: Comprehensive legislative framework in Italy and Switzerland. *Energy Policy* 161, 112772. doi:10.1016/j.enpol.2021. 112772.
- Luković, J., Bajat, B., Kilibarda, M., Filipović, D., 2015. High resolution grid of potential incoming solar radiation for Serbia. *Thermal Science* 19, 427–435.

- Mérida-Rodríguez, M., Reyes-Corredora, S., Pardo-García, S., Zayas-Fernández, B., 2015. Solar Photovoltaic Power in Spain, in: Frolova, M., Prados, M.J., Nadaï, A. (Eds.), Renewable Energies and European Landscapes: Lessons from Southern European Cases. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 63–80. doi:10.1007/978-94-017-9843-3_4.
- Mohajeri, N., Assouline, D., Guiboud, B., Bill, A., Gudmundsson, A., Scartezzini, J.L., 2018. A city-scale roof shape classification using machine learning for solar energy applications. *Renewable Energy* 121, 81–93. doi:10.1016/j.renene.2017.12.096.
- Moreno-Munoz, A., 2021. Inequality built into the grid. *Nature Energy* 6, 852–853. doi:10.1038/s41560-021-00873-y.
- Mundaca, L., Samahita, M., 2020. What drives home solar PV uptake? Subsidies, peer effects and visibility in Sweden. *Energy Research & Social Science* 60, 101319. doi:10.1016/j.erss.2019.101319.
- Muntasser, M.A., Bara, M.F., Quadri, H.A., EL-Tarabelsi, R., La-azebi, I.F., 2000. Photovoltaic marketing in developing countries. *Applied Energy* 65, 67–72. doi:10.1016/S0306-2619(99)00094-X.
- Noll, D., Dawes, C., Rai, V., 2014. Solar Community Organizations and active peer effects in the adoption of residential PV. *Energy Policy* 67, 330–343. doi:10.1016/j.enpol.2013.12.050.
- Obane, H., Nagai, Y., Asano, K., 2020. Assessing land use and potential conflict in solar and onshore wind energy in Japan. *Renewable Energy* 160, 842–851. doi:10.1016/j.renene.2020.06.018.
- Palm, A., 2016. Local factors driving the diffusion of solar photovoltaics in Sweden: A case study of five municipalities in an early market. *Energy Research & Social Science* 14, 1–12. doi:10.1016/j.erss.2015.12.027.
- Palm, A., 2017. Peer effects in residential solar photovoltaics adoption—A mixed methods study of Swedish users. *Energy Research & Social Science* 26, 1–10. doi:10.1016/j.erss.2017.01.008.
- Palm, A., Lantz, B., 2020. Information dissemination and residential solar PV adoption rates: The effect of an information campaign in Sweden. *Energy Policy* 142, 111540. doi:10.1016/j.enpol.2020.111540.
- Palmer, D., Koumpli, E., Cole, I., Gottschalg, R., Betts, T., 2018. A GIS-Based Method for Identification of Wide Area Rooftop Suitability for Minimum Size PV Systems Using LiDAR Data and Photogrammetry. *Energies* 11, 3506. doi:10.3390/en11123506.
- Pang, W., Cui, Y., Zhang, Q., Wilson, G.J., Yan, H., 2020. A comparative analysis on performances of flat plate photovoltaic/thermal collectors in view of operating media, structural designs, and climate conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 119, 109599. doi:10.1016/j.rser.2019.109599.
- Price, B., Kienast, F., Seidl, I., Ginzler, C., Verburg, P.H., Bolliger, J., 2015. Future landscapes of Switzerland: Risk areas for urbanisation and land abandonment. *Applied Geography* 57, 32–41. doi:10.1016/j.apgeog.2014.12.009.

- Quirós, E., Pozo, M., Ceballos, J., 2018. Solar potential of rooftops in Cáceres city, Spain. *Journal of Maps* 14, 44–51. doi:10.1080/17445647.2018.1456487.
- Qureshi, T.M., Ullah, K., Arentsen, M.J., 2017. Factors responsible for solar PV adoption at household level: A case of Lahore, Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78, 754–763. doi:10.1016/j.rser.2017.04.020.
- Raaflaub, L.D., Collins, M.J., 2006. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. *Environmental Modelling & Software* 21, 710–732. doi:10.1016/j.envsoft.2005.02.003.
- Rai, V., Reeves, D.C., Margolis, R., 2016. Overcoming barriers and uncertainties in the adoption of residential solar PV. *Renewable Energy* 89, 498–505. doi:10.1016/j.renene.2015.11.080.
- Reindl, K., Palm, J., 2021. Installing PV: Barriers and enablers experienced by non-residential property owners. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 141, 110829. doi:10.1016/j.rser.2021.110829.
- Saladié, Ò., Zaragozí, B., Saladié, S., Salvat, Ll., Rovira, M.T., Blay, J., 2022. Determinació del potencial d'autoabastiment elèctric dels municipis de la demarcació de Tarragona a partir d'energia fotovoltaica i eòlica instal·lada en entorns urbans. Grup de Recerca d'Anàlisi Territorial i Estudis Turístics. Departament de Geografia de la Universitat Rovira i Virgili. Projecte URV.FC03.01.00 (2021/09). Conveni marc DIPTA-URV 2020-2023
- Sattler, S., Zluwa, I., Österreicher, D., 2020. The “PV Rooftop Garden”: Providing Recreational Green Roofs and Renewable Energy as a Multifunctional System within One Surface Area. *Applied Sciences* 10, 1791. doi:10.3390/app10051791.
- Schelly, C., 2014. Residential solar electricity adoption: What motivates, and what matters? A case study of early adopters. *Energy Research & Social Science* 2, 183–191. doi:10.1016/j.erss.2014.01.001.
- Serrano, D., Margalida, A., Pérez-García, J.M., Juste, J., Traba, J., Valera, F., Carrete, M., Aihartza, J., Real, J., Mañosa, S., Flaquer, C., Garin, I., Morales, M.B., Alcalde, J.T., Arroyo, B., Sánchez-Zapata, J.A., Blanco, G., Negro, J.J., Tella, J.L., Ibañez, C., Tellería, J.L., Hiraldo, F., Donázar, J.A., 2020. Renewables in Spain threaten biodiversity. *Science* 370, 1282–1283. doi:10.1126/science.abf6509.
- Shiraishi, K., Shirley, R.G., Kammen, D.M., 2019. Geospatial multi-criteria analysis for identifying high priority clean energy investment opportunities: A case study on land-use conflict in Bangladesh. *Applied Energy* 235, 1457–1467. doi:10.1016/j.apenergy.2018.10.123.
- Sreenath, S., Sudhakar, K., Yusop, A.F., Cuce, E., Solomin, E., 2020. Analysis of solar PV glare in airport environment: Potential solutions. *Results in Engineering* 5, 100079. doi:10.1016/j.rineng.2019.100079.
- Stowell, D., Kelly, J., Tanner, D., Taylor, J., Jones, E., Geddes, J., Chalstrey, E., 2020. A harmonised, high-coverage, open dataset of solar photovoltaic installations in the UK. *Scientific Data* 7, 394. doi:10.1038/s41597-020-00739-0.

- Thai, C., Brouwer, J., 2021. Challenges estimating distributed solar potential with utilization factors: California universities case study. *Applied Energy* 282, 116209. doi:10.1016/j.apenergy.2020.116209.
- Toboso-Chavero, S., Nadal, A., Petit-Boix, A., Pons, O., Villalba, G., Gabarrell, X., Josa, A., Rieradevall, J., 2019. Towards Productive Cities: Environmental Assessment of the Food-Energy-Water Nexus of the Urban Roof Mosaic. *Journal of Industrial Ecology* 23, 767–780. doi:10.1111/jiec.12829.
- Vaishnav, P., Horner, N., Azevedo, I.L., 2017. Was it worthwhile? Where have the benefits of rooftop solar photovoltaic generation exceeded the cost? *Environmental Research Letters* 12, 094015. doi:10.1088/1748-9326/aa815e.
- Vargas-Salgado, C., Aparisi-Cerdá, I., Alfonso-Solar, D., Gómez-Navarro, T., 2022. Can photovoltaic systems be profitable in urban areas? Analysis of regulation scenarios for four cases in Valencia city (Spain). *Solar Energy* 233, 461–477. doi:10.1016/j.solener.2022.01.057.
- Vasseur, V., Kemp, R., 2015. The adoption of PV in the Netherlands: A statistical analysis of adoption factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 483–494. doi:10.1016/j.rser.2014.08.020.
- Wang, D., 2017. Benchmarking the Performance of Solar Installers and Rooftop Photovoltaic Installations in California. *Sustainability* 9, 1403. doi:10.3390/su9081403.
- Xue, Y., Lindkvist, C.M., Temeljotov-Salaj, A., 2021. Barriers and potential solutions to the diffusion of solar photovoltaics from the public-privatepeople partnership perspective – Case study of Norway. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 137, 110636. doi:10.1016/j.rser.2020. 110636.
- Yin, H., Zhou, K., 2022. Performance evaluation of China's photovoltaic poverty alleviation project using machine learning and satellite images. *Utilities Policy* 76, 101378. doi:10.1016/j.jup.2022.101378.
- Zaragozí, B., Belda, A., Linares, J., Martínez-Pérez, J., Navarro, J., Esparza, J., 2012. A free and open source programming library for landscape metrics calculations. *Environmental Modelling & Software* 31, 131–140. doi:10.1016/j.envsoft.2011.10.009.
- Zhong, Z., Zhang, Y., Shen, H., Li, X., 2020. Optimal planning of distributed photovoltaic generation for the traction power supply system of high-speed railway. *Journal of Cleaner Production* 263, 121394. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121394.

8 ANNEXOS

8.1 Exemples de fitxes

