

Lluís SALVAT GARCIA

**CREACIÓ D'UN CADASTRE SOLAR DE LA
PROVINCIA DE TARRAGONA**

TREBALL DE FI DE GRAU

dirigit pel Dr. Benito Zaragoza

Grau en Geografia, Anàlisi territorial i Sostenibilitat



UNIVERSITAT ROVIRA i VIRGILI

Vila-seca

2023

Agraïments

En primer lloc, voldria agrair a tots els docents i investigadors de la Facultat de Turisme i Geografia de la Universitat Rovira i Virgili per la formació rebuda durant els quatre anys del Grau de Geografia, Anàlisi Territorial i Sostenibilitat. En especial, voldria concebre els agraïments al Dr. Benito Zaragoza, tutor del treball, i a docents com el Dr. Javier Sigró, la Dra. Yolanda Pérez i la Dra. M.T. Rovira que m'han permès aprendre i millorar diferents mètodes aplicats a la Geografia.

Amb el mateix escaló, m'agradaria prear al Dr. Sergi Saladié, el Dr. Òscar Saladié i el Dr. Jordi Blay per haver-me permès desenvolupar tasques de recerca en projectes vinculats amb la Transició Energètica.

Finalment, voldria dirigir els principals agraïments als meus companys d'estudi i en especial a la meua família, que mai ha deixat de donar-me suport i confiança.

Resum

El canvi climàtic i el context energètic actual fan que l'aprofitament de l'energia solar fotovoltaica sigui una prioritat. S'espera que en els propers anys aquest aprofitament es desenvolupi especialment en les zones urbanes i en entorns fortament antropitzats. Tot i això, malgrat l'abundància de dades georeferenciades i eines de modelatge, manquen dades essencials per a estudiar el procés d'adopció d'aquest mode de producció energètica.

El present estudi proposa dissenyar una metodologia per elaborar un catàleg – o més ben dit un *cadastre solar* – de la província de Tarragona que reculli informació útil per la planificació i seguiment de la consecució dels objectius de producció d'energia solar fotovoltaica. En concret, el cadastre es constitueix com l'agrupació d'informació pública georeferenciada disponible, la creació de models d'energia solar potencial amb alta resolució espacial (5 metres) i temporal (mensual), i la incorporació d'un catàleg d'instal·lacions fotovoltaïques actualitzat.

Si bé el cadastre pretén agrupar les dades més recents possibles, el pas del temps afectarà en l'actualització de la informació incorporada. De la mateixa manera, encara hi ha marge per augmentar la resolució espacial i temporal del model d'energia solar potencial., Els resultats indicaran que de cara al futur són prioritàries les bases de dades amb informació detallada sobre instal·lacions fotovoltaïques.

Paraules clau: SIG, *cadastre solar*, cobertes, energies renovables, energia solar, fotovoltaica (FV).

Resumen

El cambio climático y el contexto energético actual hacen que el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica sea una prioridad. Se espera que en los próximos años este aprovechamiento se desarrolle especialmente en las zonas urbanas y entornos fuertemente antropizados. Sin embargo, a pesar de la abundancia de datos georeferenciados y herramientas de modelado, carecen de datos esenciales para estudiar el proceso de adopción de este modo de producción energética.

El presente estudio propone diseñar un catálogo – o mejor dicho un catastro solar – de la provincia de Tarragona que recoja información útil para la planificación y seguimiento de la consecución de los objetivos de producción de energía solar fotovoltaica. En concreto, el catastro se constituye como la agrupación de información pública georeferenciada disponible, la creación de modelos de energía solar potencial con alta resolución espacial (5 metros) y temporal (mensual), y la incorporación de un catálogo de instalaciones fotovoltaicas actualizado.

Si bien el catastro pretende agrupar los datos más recientes posibles, el paso del tiempo afectará a la actualización de la información incorporada. Del mismo modo, todavía existe margen para aumentar la resolución espacial y temporal del modelo de energía solar potencial. Los resultados indicarán que de cara al futuro son prioritarias las bases de datos con información detallada sobre instalaciones fotovoltaicas.

Palabras clave: SIG, catastro solar, cubiertas, energías renovables, energía solar, fotovoltaica (FV).

Abstract

Climate change and the current energy context make the use of photovoltaic solar energy a priority. It is expected that in the coming years this use will develop especially in urban areas and in heavily anthropized environments. However, despite the abundance of georeferenced data and modeling tools, there is a lack of essential data to study the adoption process of this mode of energy production.

The present study proposes to design a catalog - or rather a solar cadastre - of the province of Tarragona that collects useful information for the planning and monitoring of the achievement of the objectives of solar photovoltaic energy production. Specifically, the cadastre is constituted by the grouping of georeferenced public information available, the creation of models of potential solar energy with high spatial (5 meters) and temporal (monthly) resolution, and the incorporation of a catalog of photovoltaic installations updated.

Although the cadastre aims to group the most recent data possible, the passage of time will affect the updating of the incorporated information. Likewise, there is still room to increase the spatial and temporal resolution of the potential solar energy model. The results indicate that for the future databases with detailed information on photovoltaic installations are a priority.

Keywords: GIS, solar cadastre, roofs, renewable energies, solar energy, photovoltaics (PV).

Índex de continguts

1. Introducció.....	15
1.1 Canvi climàtic i la necessitat d'una nova transició energètica	15
1.2 Energia solar fotovoltaica.....	17
1.3 Estimació del potencial fotovoltaic	19
1.4 Precedents i justificació	22
1.5 Objectius.....	23
2. Metodologia.....	25
2.1 Cas d'estudi	25
2.2 Bases de dades disponibles.....	29
2.3 Mètode de treball	30
2.4 Generació de models de radiació solar	33
2.4.1 Model Digital de Superfícies	33
2.4.1 Models de Radiació Solar.....	34
2.5 Aptitud de les cobertes	37
2.5.1 Edifici (<i>Building</i>).....	40
2.5.2 Part d'edifici (<i>BuildingPart</i>).....	44
2.5.3 Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic.....	45
2.5.4 Béns culturals d'interès nacional (BCIN).....	47
2.5.4 Municipis	49
2.6 Càlcul d'escenaris i operacions derivades del <i>Cadastre solar</i>	49

2.6.1 Estadístiques zonals entre els Models de Radiació Solar i les Parts d'Edificis	50
2.6.2 Càlcul del potencial de producció elèctrica, número de plaques solars i potència instal·lable.	51
2.6.3 Escenaris d'aptitud	55
3. Resultats	59
3.1. Estructura del <i>Cadastre solar</i>	59
3.2 Exemple de <i>Cadastre solar</i>	60
3.3 Escenaris definits a partir del <i>cadastre solar</i>	64
3.4 Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic.....	83
4. Discussió.....	88
4.1 Elaboració d'un <i>cadastre solar</i>	88
4.2 Aplicacions d'un <i>cadastre solar</i>	90
4.3 Limitacions	93
5. Conclusions i propostes de treball futur	96
6. Bibliografia.....	99
7. Recursos temàtics	105
8. Annexos.....	107

Índex de figures

Figura 1. Limits administratius de la província de Tarragona. Elaboració pròpia a partir de l'ICGC (2023).....	26
Figura 2. Consum elèctric mitjà anual (2013-2020) en Gwh dels municipis de la província de Tarragona. Font: Saladié <i>et al.</i> , 2022.	27
Figura 3. Medi físic de la província de Tarragona. Elaboració pròpia a partir del CNIG (2021).	28
Figura 4. Flux de treball per generar el <i>cadastre solar</i> de la província de Tarragona. Elaboració pròpia.....	31
Figura 5. Model digital de superfícies de la província de Tarragona (5m). Font: CNIG (2021).	33
Figura 6. Mapa de la radiació solar total (kWh/m ² /any). Font: Elaboració pròpia a partir del CNIG (2021).....	35
Figura 7. Model de radiació solar total (kWh/m ² /any). Model de radiació solar (kWh/m ² /any). El cas de l'àmbit urbà de Reus, Tarragona i els Ports de Tortosa. Font: Elaboració pròpia a partir del CNIG, 2021.....	36
Figura 8. Mapa de les cobertes de les parts d'edifici de la província de Tarragona. Font: Capa <i>BuildingPart</i> del servei de descàrrega ATOM del Cadastre (DG del Catastro, 2023).	38
Figura 9. Exemple d'un polígon de la capa Edifici (esquerra) i els polígons de la capa Part d'Edifici (dreta). Font: Capes <i>Building</i> i <i>BuildingPart</i> del servei de descàrrega ATOM del Cadastre (DG del Catastro, 2023).....	39
Figura 10. Exemples de polígons amb diferents valors de l'índex SHAPE. Part d'edifici amb índex 1,02 (esquerra). Part d'edifici amb índex 13,13 (dreta).....	41

- Figura 11.** Exemples de polígons amb diferents valors de l'índex FRAC. Part d'edifici amb índex 1 (esquerra). Part d'edifici amb índex 16,09 (dreta)..... 42
- Figura 12.** Exemple I de l'exercici de relocalització de les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic. La ubicació inicial de les instal·lacions es situava a l'extrem superior esquerra de la figura; d'aquest punt es van relocalitzar les plaques FV en funció de la potència-mida observada a la ortofoto. Font: ICAEN (2023b). 46
- Figura 13.** Exemple II de l'exercici de relocalització de les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic. La ubicació inicial de la instal·lació es situava a l'extrem inferior dret de la figura i es reubica a l'extrem superior esquerra de la figura en funció de la potència-mida observada a la ortofoto. Font: ICAEN (2023b). 46
- Figura 14.** Béns culturals d'interès nacional (BCIN). Font: Institut d'Estadística de Catalunya (IEC, 2023). 48
- Figura 15.** Gràfic d'embut simbolitzant el model de definició dels filtres i escenaris plantejats. 56
- Figura 16.** Model de radiació solar total en kWh/m²/any (esquerra) i radiació mitjana de la coberta en intervals en kWh/m²/any (dreta). El cas d'una coberta d'una part d'edifici al municipi de la Bisbal del Penedès. 61
- Figura 17.** Gràfics d'embut dels cinc escenaris definits, de menys restrictiu (I) a més restrictiu (V). Es mostra la radiació mitjana acumulada de totes les cobertes (GWh) i com els diferents filtres aplicats afecten a l'aprofitament potencial d'energia solar a les cobertes dels edificis. 65
- Figura 18.** Coberta del municipi de Prades sense aptitud per a instal·lar plaques fotovoltaïques descartada per tenir una superfície menor a 10 m². 67
- Figura 19.** Exemple de coberta urbana del municipi del Vendrell amb aptitud fins l'escenari I per a instal·lar plaques fotovoltaïques. 68
- Figura 20.** Exemple de coberta industrial del municipi de Valls amb aptitud fins l'escenari II per a instal·lar plaques fotovoltaïques. 69

- Figura 21.** Exemple de coberta urbana del municipi d'Alcanar amb aptitud fins l'escenari III per a instal·lar plaques fotovoltaïques. 70
- Figura 22.** Exemple de coberta en un entorn rural del municipi d'Alforja amb aptitud fins l'escenari IV per a instal·lar plaques fotovoltaïques. 71
- Figura 23.** Exemple de coberta urbana del municipi de Riba-roja d'Ebre amb aptitud fins l'escenari V per a instal·lar plaques fotovoltaïques..... 72
- Figura 24.** Cobertes segons l'últim escenari al que són aptes (I-V; de menys restrictiu a més restrictiu). El cas d'una zona d'ús predominantment residencial de Tarragona (superior) i d'una zona d'ús predominantment industrial a Reus..... 74
- Figura 25.** Distribució (%) de la producció elèctrica FV segons l'ús dels edificis (esquerra) i distribució (%) de la superfície de cobertes segons l'ús dels edificis (esquerra). Elaboració pròpia..... 75
- Figura 26.** Percentatge de la producció elèctrica fotovoltaïca amb cobertes aptes a l'escenari V respecte la producció elèctrica amb totes les cobertes aptes als cinc escenaris de la província de Tarragona. 76
- Figura 27.** Percentatge de la producció elèctrica fotovoltaïca amb cobertes aptes a l'escenari IV respecte la producció elèctrica amb totes les cobertes aptes als cinc escenaris de la província de Tarragona. 78
- Figura 28.** Percentatge de la producció elèctrica fotovoltaïca amb cobertes aptes a l'escenari III respecte la producció elèctrica amb totes les cobertes aptes als cinc escenaris de la província de Tarragona. 79
- Figura 29.** Percentatge de la producció elèctrica fotovoltaïca amb cobertes aptes a l'escenari II respecte la producció elèctrica amb totes les cobertes aptes als cinc escenaris de la província de Tarragona. 81
- Figura 30.** Percentatge de la producció elèctrica fotovoltaïca amb cobertes aptes a l'escenari I respecte la producció elèctrica amb totes les cobertes aptes als cinc escenaris de la província de Tarragona. 82

Figura 31. Nombre total d'instal·lacions d'autoconsum FV per municipis (esquerra), potència total instal·lada d'autoconsum FV en kW per municipis (dreta). Font: ICAEN (2023b) .	83
Figura 32. Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaïques fins el desembre del 2019. Font: ICAEN (2023b).	84
Figura 33. Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaïques fins el març del 2022. Font: ICAEN (2023b).	84
Figura 34. Número d'instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic segons l'últim escenari d'aptitud (I-V; de menys restrictiu a més restrictiu).	85
Figura 35. Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic (punt vermell) sobre les cobertes segons l'últim escenari al que són aptes (I-V; de menys restrictiu a més restrictiu). El cas de Reus, Móra la Nova i Cunit.	87
Figura 36. Visors amb el potencial d'energia solar per cobertes d'edificis. Instituto Geográfico Nacional (superior), PVGIS elaborat per la Unió Europea (mitjà superior), Potencial Solar d'Andorra Recerca i Innovació (mitjà inferior) i Idealista (inferior). ...	92
Figura 37. Cobertes d'edificis detectades amb ortofotografies actuals sobre el municipi de Riudoms, però no incorporades a la base del cadastre. Font: Capa BuildingPart del servei de descàrrega ATOM (DG del Catastro, 2023).	95
Figura 38. Codi de definició de l'escenari I d'aptitud de les cobertes.	107
Figura 39. Codi de definició de l'escenari II d'aptitud de les cobertes.	108
Figura 40. Codi de definició de l'escenari III d'aptitud de les cobertes.	109
Figura 41. Codi de definició de l'escenari IV d'aptitud de les cobertes.	110
Figura 42. Codi de definició de l'escenari V d'aptitud de les cobertes.	111
Figura 43. Codi per automatitzar la generació de models de radiació solar mensuals.	113

Índex de taules

Taula 1. Dades de base del <i>cadastre solar</i>	29
Taula 2. Distribució en superfície i percentatge de les cobertes d'edificis categoritzat pel número de plantes.	39
Taula 3. Informació associada a la capa Edifici (<i>Building</i>)	43
Taula 4. Informació associada a la capa Part d'edifici (<i>BuildingPart</i>).....	45
Taula 5. Informació associada a la capa d'instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic. ...	47
Taula 6. Informació associada als Béns Culturals d'Interès Nacional.	49
Taula 7. Informació associada als municipis.	49
Taula 8. Informació associada als models de radiació solar.....	50
Taula 9. Informació associada al potencial de producció elèctrica, número de plaques solars i potència instal·lable.	51
Taula 10. Procediment per calcular la producció estimada d'energia elèctrica fotovoltaica.	52
Taula 11. Procediment per calcular el número de panells FV estimats.....	54
Taula 12. Procediment per calcular la potència instal·lada estimada.	55
Taula 13. Informació associada als escenaris d'aptitud de les cobertes.	58
Taula 14. Estructura del <i>cadastre solar</i>	59
Taula 15. Informació completa de la base de dades del <i>cadastre solar</i> . El cas d'una coberta d'una part d'edifici al municipi de la Bisbal del Penedès.....	61

Taula 16. Número de panells solars fotovoltaics, potència (MW) i producció elèctrica estimada (GWh) segons l'ús de l'edifici de les cobertes de la província de Tarragona que compleixen l'escenari d'aptitud V.....	76
Taula 17. Número de panells solars fotovoltaics, potència (MW) i producció elèctrica estimada (GWh) segons l'ús de l'edifici de les cobertes de la província de Tarragona que compleixen l'escenari d'aptitud IV.	77
Taula 18. Número de panells solars fotovoltaics, potència (MW) i producció elèctrica estimada (GWh) segons l'ús de l'edifici de les cobertes de la província de Tarragona que compleixen l'escenari d'aptitud III.	79
Taula 19. Número de panells solars fotovoltaics, potència (MW) i producció elèctrica estimada (GWh) segons l'ús de l'edifici de les cobertes de la província de Tarragona que compleixen l'escenari d'aptitud II.....	80
Taula 20. Número de panells solars fotovoltaics, potència (MW) i producció elèctrica estimada (GWh) segons l'ús de l'edifici de les cobertes de la província de Tarragona que compleixen l'escenari d'aptitud I.	82

1. Introducció

1.1 Canvi climàtic i la necessitat d'una nova transició energètica

El **Canvi Climàtic** és un repte global en curs que té importants repercussions en el medi ambient, la societat i l'economia (Santos, 2022). En les últimes dècades, la combustió de recursos fòssils per la producció d'energia ha estat un dels principals motors del canvi climàtic, ja que segons el Panell Intergovernamental del Canvi Climàtic (IPCC, 2022) condueix a l'emissió de gasos d'efecte hivernacle que atrapen la calor en l'atmosfera i provoquen un augment de les temperatures globals. Les activitats humanes, principalment a través de les emissions de gasos d'efecte hivernacle, han provocat inequívocament l'escalfament global, amb la temperatura de la superfície global assolint en el període 2011-2020 1,1 °C per sobre respecte la mitjana del període 1850–1900 (IPCC, 2023). En el mateix informe, l'IPCC també apunta que si les emissions de gasos d'efecte hivernacle continuen augmentant, amb contribucions històriques i contínues desiguals derivades de l'ús no sostenible de l'energia, l'ús del sòl i els canvis d'ús del sòl, estils de vida i patrons de consum i producció entre regions i entre individus, provocaran, dintre dels escenaris més optimistes, un augment de la temperatura fins a 1,5 °C a curt termini.

Per a mitigar els efectes del canvi climàtic, tot indica que s'hauria de realitzar una transició cap a les fonts d'energia renovables, aquelles que es regeneren de manera natural i no emeten gasos d'efecte d'hivernacle. En aquest sentit, la **Transició Energètica** es concep com el canvi de l'ús de combustibles fòssils com a font primària d'energia cap a fonts renovables com puguin ser l'energia eòlica, solar, geotèrmica o hidroelèctrica. La transició està impulsada, entre diverses raons, per la necessitat de reduir les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle. Per aconseguir aquests objectius, la Directiva revisada sobre energies renovables 2018/2001/UE (Parlament Europeu, 2018) estableix que per al 2030 almenys el 32% de les necessitats energètiques totals de la UE haurien de cobrir-se amb energies renovables. D'acord amb aquestes polítiques, l'impuls de l'adopció d'energies renovables ha crescut en els darrers anys, fins al punt que, segons l'Agència Internacional d'Energia Renovable (IRENA, 2019), les fonts d'energia renovables van representar quasi tres quartes parts de les noves capacitats d'energia implantades a tot el món el 2019.

A nivell global, està augmentant l'estoc d'energies renovables amb la instal·lació de 295 GW l'any 2022, dels quals gairebé dos terços pertanyen a tecnologies d'energia solar (192 GW), i 75 GW a l'energia eòlica. Amb aquestes xifres queda demostrada una davallada de l'energia eòlica que no aconsegueix superar els 111 GW de potència instal·lada l'any 2020 (IRENA, 2022). La mateixa font, apunta que a finals de 2022, les renovables representaven el 40% de la capacitat d'energia instal·lada global., No obstant això, cada cop més a prop d'un món on les energies renovables representen la meitat de la capacitat total, cal molta planificació energètica per adaptar-les com la font de generació elèctrica més important, inclosa la xarxa de connexió i distribució de la mateixa. Sense sortir de l'òptica global, l'Agència Internacional de l'Energia (IEA, 2020) afirma que per l'horitzó temporal del 2050, l'adopció de fonts d'energia renovables podria reduir les emissions globals de diòxid de carboni en un 70%. D'aquesta manera, per limitar l'augment de la temperatura global fins a 1,5°C per sobre dels nivells preindustrials, el món necessita veure ampliada la capacitat de producció renovable en més de 1.000 GW anuals fins al 2050, on l'energia solar representaria més de la meitat d'aquesta xifra (IRENA, 2022).

Per l'any 2022, a Espanya s'estimava que es podrien haver superat els 117 GW de potència renovable instal·lada, un 3,8% superior a la registrada el 2021, on s'han sumat 4,6 GW de renovables, en concret 1,2 GW eòlics i 3,4 GW fotovoltaics (REE, 2022). A escala regional, en línia amb els objectius de canvi climàtic plantejats per la Unió Europea, Catalunya té la intenció d'aconseguir el 2030 el 50% de la generació d'electricitat a través de fonts renovables, i al 100% per a l'any 2050 (ICAEN, 2023a).

Una altra causa que pot empenyer les persones a adoptar energies renovables són els **alts costos de l'energia**. En aquest sentit, els preus al consum de la electricitat, gas i altres combustibles han passat de 100 punts l'any 2015 a 172,3 punts l'any 2023 (Consell de la Unió Europea, 2023). El preu mitjà final anual de l'electricitat a Espanya passa de 40,3 €/MWh a 204,7 €/MWh entre l'any 2020 i el 2022 (Statista, 2023). L'augment de costos en els darrers anys és evident, i té diverses causes (Periódico, 2022) però les renovables podrien evitar les escalades de preus. Impulsat per la reducció de costos, l'electricitat d'origen renovable és cada cop més competitiva en termes de costos amb les centrals tèrmiques convencionals, i la solar fotovoltaica s'ha convertit en la font d'electricitat històricament de menys cost de producció (Bogdanov, 2021).

1.2 Energia solar fotovoltaica

L'evolució favorable de l'energia solar fotovoltaica com a font renovable per sobre inclús de l'energia eòlica - recordi's que 192 GW dels 295 GW d'energies renovables instal·lades l'any 2022 al món van ser tecnologies de solar fotovoltaica (IRENA, 2022) – està conduint a prioritzar la utilització de les tecnologies que transformen l'energia solar fotovoltaica en energia elèctrica. Les tecnologies responsables d'aquest procés són els **panells solars fotovoltaics**. Aquests estan formats per un conjunt de cèl·lules que produeixen electricitat en forma de corrent continu a partir de l'energia que proporciona el Sol. Una cel·la fotovoltaica és un dispositiu electrònic que transforma els fotons de l'energia solar en energia elèctrica mitjançant l'efecte fotoelèctric. En aquest sentit, hi ha dos tipus de panells solar: els de silici cristallitzat, que poden ser monocristal·lins (els més utilitzats en les llars) o policristal·lins; i els amorfs (National Grid, 2023).

L'energia fotovoltaica s'ha vist incrementada a causa, d'entre altres raons, de la disminució significativa del cost dels panells fotovoltaics durant les darreres dècades propiciada pels avenços tecnològics, els incentius tarifaris governamentals i l'excés de producció (Barron, 2015) que donen suport al desplegament d'infraestructures renovables, fent-los més accessibles per a les llars i les empreses. En els darrers anys, s'han introduït avenços tecnològics per a millorar l'eficiència energètica de les plaques solars mitjançant la modificació espectral, un mètode que permet aconseguir una major eficiència de les cèl·lules solars (Chen *et. al* 2021). Gràcies a les innovacions tecnològiques i els factors econòmics i productius, els costos d'instal·lar panells solars al món s'han reduït. En concret el cost mitjà global dels panells fotovoltaics ha disminuït un 82% des del 2010 (IRENA, 2020). A Espanya, l'evolució del cost ha estat de 0,2891 USD/kWh de placa solar fotovoltaica l'any 2010 a 0,0561 USD/kWh l'any 2019, reafirmant una disminució del 82%. I de cara al futur, s'espera que aquesta tecnologia permeti reduir les factures d'electricitat generant electricitat in situ i reduint la necessitat de comprar electricitat a la xarxa. Com a conseqüència de la disminució del cost dels panells solars, el desplegament de panells fotovoltaics podria reduir els costos d'electricitat fins a un 50% l'any 2040 segons un informe de l'IEA (2020).

En línia amb aquesta evolució favorable de les instal·lacions fotovoltaïques a Espanya i altres territoris, segons l'Institut Català de l'Energia (ICAEN, 2023b) Catalunya ha passat

de desplegar 1,24 MW d'instal·lacions fotovoltaïques destinades a l'autoconsum l'any 2013 a assolir 466,59 MW de potència instal·lada total el primer trimestre de l'any 2022. A la província de Tarragona, la dinàmica ha estat la mateixa, de 0,15 MW instal·lats l'any 2013 fins els 58,87 MW totals l'any 2022. El 76,7% de les instal·lacions d'autoconsum de Tarragona tenen una potència menor als 5 kW mentre el 20,7% se situen entre els 5 i 25 kW i les categories superiors es queden en valors percentuals molt inferiors, el que indicaria que els principals impulsors d'aquestes tecnologies són els petits consumidors. Amb l'evolució favorable observada amb les dades de l'ICAEN, de cara al futur es pot preveure una alça significativa de noves instal·lacions fotovoltaïques.

En referència a les **limitacions**, un dels principals problemes derivat de les energies fotovoltaïques és el model d'implantació d'aquestes tecnologies. La problemàtica neix amb l'aterratge de projectes de centrals solars implantades sobre sòls amb una capacitat agrològica alta que poden posar en perill l'autosuficiència alimentària d'un territori, o sobre sòls amb valors naturals elevats on la flora, la fauna i les relacions ecològiques amb l'entorn quedin amenaçades.

Un altre problema és la inseguretat generada per la indefinició de les normatives relacionades amb l'adopció d'energies renovables. Així doncs, Saladié (2021) destaca que cal establir una normativa clara en aquest sentit, una correcta planificació territorial que reequilibri producció i consum, amb mesures fiscals per estimular la generació distribuïda i l'autoconsum. També són notícies recurrents l'allau de sol·licituds per implantar parcs solars en terrenys agrícoles i la projecció de parcs fotovoltaïcs allunyats dels centres de demanda i ubicats principalment sobre sòls agrícoles que comprometen paisatgísticament molts entorns rurals (CCMA, 2021).

És per aquestes raons, que el model d'implantació d'energies renovables hauria d'ajustar-se a espais i cobertes antropitzades. Aquest plantejament vé introduït per **l'article 19 de la LLEI 16/2017, de l'1 d'agost, del canvi climàtic** on un dels objectius defineix que *“les energies renovables s'han de desenvolupar, sempre que sigui possible, aprofitant espais ja alterats per l'activitat humana a fi de minimitzar l'ocupació innecessària del territori i prioritzar l'ocupació de les cobertes de les edificacions i altres construccions*

auxiliars, incloses les pèrgoles dels aparcaments de vehicles, i l'ocupació del sòl diferent del no urbanitzable, i, dins el sòl no urbanitzable, els espais agraris en desús.” L'altre objectiu, diu així: “promoure les mesures necessàries en l'àmbit de les energies renovables perquè el consum elèctric de Catalunya provingui — en un 50% l'any 2030 i un 100% l'any 2050 — d'aquestes fonts renovables, prioritzant la proximitat de la producció elèctrica d'origen renovable als centres de consum.”

En línia amb els objectius de l'article 19 de la Llei de canvi climàtic de Catalunya, la implantació d'instal·lacions fotovoltaïques hauria d'anar dirigida a entorns urbans. L'estimació de la seva implantació en un territori concret, s'ha de decidir a partir de la revisió de diferents aproximacions.

1.3 Estimació del potencial fotovoltaic

L'estimació de la producció fotovoltaica d'un territori per dotar d'informació a la planificació territorial i planificació energètica, és pot realitzar a partir del càlcul del potencial de les energies solars sobre els terrats o cobertes d'un cas d'estudi determinat. Les aproximacions per estimar la producció d'energia elèctrica en un territori a partir de l'energia solar incident són molt diverses. En aquest sentit, cal avaluar les propostes que s'han desenvolupat en altres estudis.

Els mètodes desenvolupats per estimar el potencial fotovoltaic de les cobertes van des de simples multiplicadors de la superfície total de l'edifici, fins a mètodes que utilitzen complexos sistemes d'informació geogràfica (SIG¹) o models tridimensionals (3D). Aquests últims, a diferència dels primers, són més detallats i es poden reproduir en diverses regions, no obstant això, quan es combinen sistemes d'informació geogràfica amb dades

¹ SIG (Sistemes d'Informació Geogràfica) és un sistema emprat per descriure i categoritzar la Terra i altres geografies amb l'objectiu de mostrar i analitzar la informació a què fa referència espacialment.

de Lighting Detection and Ranging (LiDAR²) es requereix de més temps i més recursos (Melius *et al.*, 2013).

L'ús de dades LiDAR combinades amb SIG és molt comú, per exemple, s'utilitza per a representar de forma precisa les zones urbanes i la orografia influent a la generació d'ombres en l'anàlisi del potencial solar fotovoltaic a escala urbana del Principat d'Andorra (Travesset-Baro *et al.*, 2021). Una altra possibilitat és utilitzar dades LiDAR per generar la informació tridimensional i vertical de l'àmbit d'estudi (Caamaño & Díaz-Palacios, 2019). En molts casos també s'utilitzen models digitals de superfície (MDS³) d'alta resolució (1m) derivats de punts LiDAR per construir models robustos i precisos en relació a les cobertes urbanes d'estudi (Quirós *et al.*, 2018). També es poden introduir variables no vinculades a l'estimació fotovoltaica com plantegen Torres-Rivas *et al.*, (2022) amb la quantificació del parc immobiliari, el rendiment de l'edifici, l'anàlisi de l'autoconsum i els objectius de millora per al sector residencial. En aquest sentit, es pot aplicar a diferents estudis de potencial solar però se centra principalment en àrees àmplies, disminuint la demanda computacional gràcies a l'agrupació del parc d'edificis.

No obstant això, no tot són avantatges en l'ús de dades i mètodes SIG. Encara hi ha moltes limitacions de modelatge SIG (Freitas *et al.*, 2015). A nivell d'entrada, les dades LiDAR també presenten limitacions, principalment errors revelats en algunes de les façanes que estan molt properes entre si. Tenir en compte la pendent o la orientació també presenta reptes importants. A més, molts models consideren superfícies planes, el que significa que elements com xemeneies, unitats d'aire condicionat o altres estructures són exclosos. També es detecten altres limitacions com el modelatge de finestres en façanes, el tractament de la vegetació a l'urbà com una superfície sòlida o no, o la conversió de potencial energètic solar a energia elèctrica produïda entre d'altres (Redweik *et al.*, 2013).

² LiDAR (Lighting Detection and Ranging; en català Detecció i abast de la llum) és una tecnologia òptica de teledetecció que mesura la distància des d'un punt emissor a qualsevol objecte o superfície mitjançant l'ús d'un làser.

³ MDS (Model digital de superfície) és el model digital amb obstacles, on es representa la superfície més elevada sobre el terreny, sigui d'origen natural (sòl, vegetació...) o artificial (edificacions, pals de la llum...).

Per a superar aquestes limitacions, és important introduir les eines FOSS⁴ – **software lliure i de codi obert** – les quals poden ser útils 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). Els mateixos autors destaquen que recentment s'han desenvolupat metodologies que incorporen l'ús d'algoritmes de *machine learning*. Aquests mètodes, basats en l'aprenentatge automàtic, tot i ser menys precisos que els basats en LiDAR, són menys costosos computacionalment pel que permeten cobrir àrees geogràfiques més extenses.

Igualment, diversos investigadors treballen en el desenvolupament de noves metodologies que combinen Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) i **aprenentatge automàtic** (Li *et al.*, 2021; Yin & Zhou, 2022). Aquestes tècniques busquen oferir una alternativa precisa i menys exigent en termes de capacitat de còmput als enfocaments basats en SIG i LiDAR. Aquest enfocament té com a objectiu principal fer estimacions a gran escala dels possibles recursos solars en cobertes, incloent-hi les incerteses associades. A més, s'espera que proporcioni estimacions fiables i precises sobre la generació d'energia elèctrica real dels panells solars instal·lats en edificis grans, impulsant així l'adopció generalitzada de sistemes d'energia neta i amb emissions de carboni baixes en entorns urbans construïts.

Aquests mètodes, es poden aplicar en **diferents escales territorials**. Per exemple, hi ha estudis que calculen el potencial fotovoltaic per a barris o ciutats, (Gooding *et al.*, 2015; Barcelona Regional, 2014; Quirós *et al.*, 2018; Palmer *et al.*, 2018) per països (Lukovi *et al.*, 2015; Huld, 2017; Travesset-Baro *et al.*, 2021), o fins i tot per a la Unió Europea (Šúri *et al.*, 2007; Bódis *et al.*, 2019).

Finalment, una proposta per **validar els resultats** de l'estimació del potencial de radiació solar i observar el grau de fiabilitat del model calculat, és utilitzar tècniques d'informació geogràfica comparades amb dades provinents d'estacions meteorològiques (Quirós *et al.*, 2018).

⁴ FOSS (Free and Open-source): Programes Lliures i de Codi Obert (en anglès) és el software que està llicenciat de tal manera que els usuaris poden estudiar, modificar i millorar el seu disseny mitjançant la disponibilitat del seu codi font.

1.4 Precedents i justificació

Una de les principals motivacions per emprendre aquest estudi, és que tot i que actualment la implantació fotovoltaica estigui en ple auge degut principalment a un augment dels costos energètics i la necessitat de realitzar una transició energètica cap a fonts renovables i sostenibles, s'observen deficiències en referència a la informació que disposen els ciutadans. En aquest sentit, disposar de dades completes i precises són crucials per a la Transició Energètica ajustada als objectius de sostenibilitat de la societat (Stowell *et al.*, 2020).

Per a empènyer als ciutadans tant en l'àmbit privat com el públic a efectuar una instal·lació fotovoltaica sobre una coberta determinada, cal conèixer una aproximació de l'estimació del potencial energètic que pot tenir aquella coberta. Com acabem de veure, aquest potencial es pot avaluar a partir d'un model digital de superfícies derivat de dades LiDAR. A més a més, per abaratir costos es poden emprar eines FOSS així com introduir automatitzacions dels processos de modelització i a la creació d'una base de dades vinculada a l'estimació del potencial fotovoltaic d'un territori. Per altra banda, les dades cadastrals poden esdevenir la millor capa cartogràfica que representi les cobertes dels edificis sobre la qual s'estimi el potencial fotovoltaic. Per finalitzar, les dades que es generin d'aquest estudi haurien d'agrupar informació que puguin arribar a ser útils per agents de la Transició Energètica.

L'interès per la creació d'un *cadastre solar* no solament es veu vinculada amb la necessitat de generar dades detallades sobre l'estimació del potencial fotovoltaic d'un territori sinó que també es deu a la meua participació com a equip de treball en dos projectes de recerca relacionats amb les energies renovables i la transició energètica (Saladié, 2022; Zaragoza, 2022). Ambdòs estudis han estat desenvolupats pel Grup de Recerca d'Anàlisi Territorial i Estudis Turístics (GRATET) del Departament de Geografia de la Universitat Rovira i Virgili mitjançant el Conveni marc Diputació de Tarragona-Universitat Rovira i Virgili 2020-2023.

Del primer estudi "*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*" es disposa a nivell municipal de l'estimació del potencial

d'autoabastiment mitjançant fonts renovables que podrà permetre impulsar projectes d'autosuficiència d'energia elèctrica, tant per les pròpies institucions locals, com pel conjunt de la ciutadania i activitats econòmiques de cadascun dels municipis (Saladié, 2022). 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. L'estudi referit és "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".

En segon lloc, neix un segon 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*" del qual també hi he estat vinculat i que he aprofitat per emprendre el present estudi. En aquest segon projecte, s'han realitzat tasques com la relocalització de 3.332 d'instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic a la província de Tarragona o la generació d'enquestes i tallers per a conèixer la implicació de les institucions públiques de la demarcació amb l'adopció d'energia solar fotovoltaica (Zaragozí, 2022). Dels darrers estudis, s'han aprofitat dades com els models digitals de superfície (MDS), la relocalització d'instal·lacions fotovoltaiques i la georeferenciació dels Béns Culturals d'Interès Nacional.

1.5 Objectius

Per tal de generar l'anomenat *cadastre solar* que aportí dades sobre el potencial fotovoltaic de la província de Tarragona i valorar la seva aplicabilitat, es plantegen els següents objectius generals:

- ✓ Proposar una metodologia per a l'elaboració d'un *cadastre solar* que ofereixi informació accessible i de qualitat als tècnics en transició energètica i energies fotovoltaiques a la província de Tarragona.
- ✓ Reflexionar sobre la utilitat que pot tenir una base de dades d'aquestes característiques per a determinades aplicacions.

Aquests objectius principals comprenen altres objectius específics:

- ✓ Avaluar les fonts d'informació disponibles, la seva qualitat i la seva aplicabilitat.
- ✓ Elaborar una metodologia reproducible i parcialment automatitzada.
- ✓ Crear - cinc - escenaris d'aptitud - de menys restrictiu a més restrictiu - de les cobertes per adoptar tecnologies fototoltaiques.
- ✓ Aplicar el *cadastre solar* per a extreure determinades xifres útils per a la planificació territorial.

2. Metodologia

La elaboració d'un *cadastre solar* de la província de Tarragona compren varies fases: (1) definir el cas d'estudi on s'emmarca el treball, (2) recollir dades de qualitat a partir de fonts oficials, (3) crear un mètode de treball reproducible, (4) generar models de radiació solar, (5) avaluar l'aptitud de les cobertes i (6) crear escenaris d'aptitud i realitzar diferents operacions a partir del *cadastre solar* per comprovar l'aplicabilitat.

2.1 Cas d'estudi

En aquest estudi he decidit aplicar la metodologia a partir de les dades disponibles i coneixements previs sobre la província de Tarragona, adquirits especialment en la participació dels anteriors estudis (Saladié, 2022; Zaragoza, 2022). En aquest sentit, el cas d'estudi del treball és la província de Tarragona, que es situa al sud de Catalunya, en ple litoral del Mediterrani.

Aquest territori cobreix una àrea de 630.638,1 hectàrees (19.64% de Catalunya) i té una població de 830.804 habitants, el 10,7% de Catalunya (INE 2022). La densitat de població és de 131,7 hab/km², inferior a la mitjana catalana que es situa en 242,7 hab/km²; però amb grans diferències entre comarques: 824 hab/km² al Tarragonès a diferència dels 15,4 hab/km².

La província de Tarragona s'organitza administrativament en 10 comarques (Figura 1) i 3 àmbits funcionals: Baix Penedès dins l'àmbit del Penedès; Alt Camp, Baix Camp, Conca de Barberà, Priorat i Tarragonès al Camp de Tarragona; i Baix Ebre, Montsià, Ribera d'Ebre i Terra Alta dins les Terres de l'Ebre. La província comprèn 184 municipis i les principals àrees urbanes són Tarragona i Reus que concentren 241.624 habitants (29% de la població de la demarcació), així com les capitals de comarca Valls, Tortosa, Amposta i el Vendrell superant totes elles els 20 mil habitants, o el litoral comprès entre Cambrils i Cunit.



Figura 1. Límits administratius de la província de Tarragona. Elaboració pròpia a partir de l'ICGC (2023).

El consum anual mitjà de tota la província de Tarragona és de 6.437,73 GWh, que representa el 16,2% del consum total d'electricitat a Catalunya (Saladié *et al.*, 2022). La característica principal del consum mitjà anual d'electricitat (2013-2020) 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 (Figura 2). 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 GWh); 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).

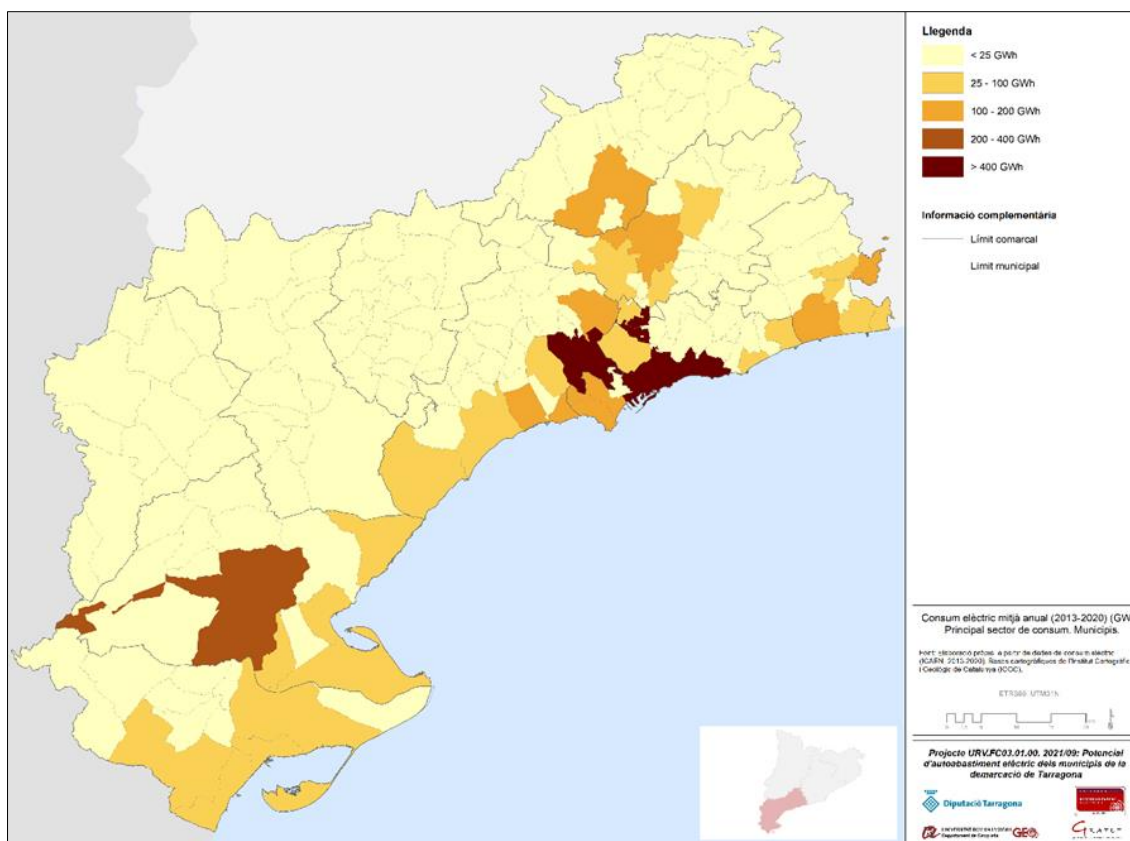


Figura 2. Consum elèctric mitjà anual (2013-2020) en Gwh dels municipis de la província de Tarragona.
Font: Saladié *et al.*, 2022.

En quant al relleu, la província s'estructura principalment per les serres prelitorals, la plana, i la depressió i desembocadura de l'Ebre. Tot i que aproximadament només un 2% de la superfície de la província es troba per sobre dels 1.000 metres d'altitud, es poden destacar serres com els Ports de Tortosa amb el Mont Caro com el punt més elevat del territori assolint els 1.434 m (Figura 3), el Montsant i les Muntanyes de Prades amb el Tossal de la Baltassana (1.202 m). Cal remarcar que les instal·lacions fotovoltaïques són més adequades a les zones planeres, mentre que als espais muntanyosos el relleu difícil, la poca accessibilitat i les ombres generades pel relleu poder generar dificultats per a les instal·lacions.

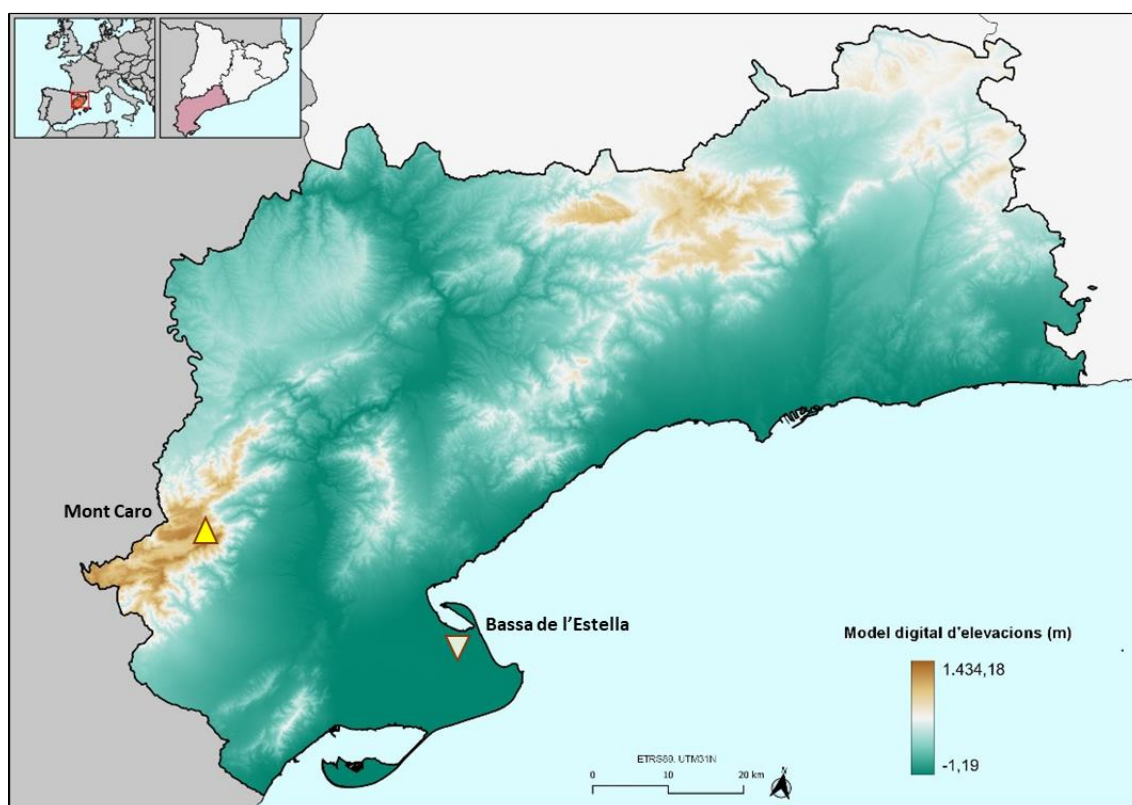


Figura 3. Medi físic de la província de Tarragona. Elaboració pròpia a partir del CNIG (2021).

La plana del Camp que s'extén des de l'extrem oriental de l'Alt Camp fins al sud del Baix Camp acull l'aglomeració Reus-Tarragona seguit d'un eix costaner especialment dens a l'àmbit del Camp i el Penedès. El front costaner de la demarcació és de 308,2 quilòmetres que representa el 35,4% de la costa catalana.

Cal remarcar que les terres baixes, per sota dels 400 metres d'altitud, ocupen més del 66% de la superfície (418.468,4 hectàrees). En aquest sentit, destaca la depressió de l'Ebre que discorre des del nord de la Ribera d'Ebre fins a la desembocadura al Delta de l'Ebre amb elevacions que no acostumen a superar els 2m com a punt de desembocadura del riu amb més cabal de la Península Ibèrica. El punt més inferior correspon a la Bassa de l'Estella a 1,19 m per sota el nivell del mar situat al Delta.

A partir del mapa de Cobertes del sòl de Catalunya (ICGC, 2017) podem determinar que els conreus es situen principalment a la plana del Camp, Conca de Barberà, Delta de l'Ebre i Montsià, Cubeta de Móra, Baix Priorat i creant un cert mosaic agroforestal l'altiplà de la Baixa Segarra i la Terra Alta ocupant un 37,9% de la superfície (239.267

ha). Si bé els conreus se solen situar en zones planes aptes per a la instal·lació de fotovoltaica, com marca la Llei 16/2017, de l'1 d'agost, del canvi climàtic és preferible que no hi hagi un solapament d'usos incompatibles i que **les energies renovables es desenvolupin sempre que sigui possible, aprofitant espais ja alterats per l'activitat humana** a fi de minimitzar l'ocupació innecessària del territori. Les masses boscoses abunden als turons i massissos muntanyosos ocupant un 55,7% de la superfície de l'àmbit (351.097 ha). El 5,2% restant correspon a sòls artificials predominantment urbans i sòl amb infraestructures de comunicació. Aquests sòls esdevenen prioritaris per a ser avaluats en relació a l'adopció tecnologies renovables.

2.2 Bases de dades disponibles

Per crear un *Cadastre solar* cal seleccionar dades temàtiques provinents de diverses fonts. En primer lloc, s'ha fet una recerca a diverses fonts d'informació per a localitzar dades SIG d'alta qualitat a una escala territorial com la província de Tarragona. En aquest sentit, la cartografia s'ha extret de fonts com el Cadastre, l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) o l'Institut Geogràfic Nacional (IGN) entre d'altres (vegeu Taula 1).

Taula 1. Dades de base del *cadastre solar*.

Capa	Tipus	Origen
Model Digital de Superfícies	Ràster	Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Building	Vectorial	Servei ATOM de
BuildingPart	(polígons)	descàrregues del Cadastre
Béns culturals d'interès nacional (BCIN)	Vectorial (punts)	Institut d'Estadística de Catalunya (IEC)
Instal·lacions d'autoconsum	Vectorial (punts)	Institut Català de l'Energia (ICAEN)

Municipis	Vectorial (polígons)	Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)
-----------	-------------------------	--

El model digital de superfícies extret del Centre de Descàrregues de l'Institut Geogràfic Nacional (IGN) és el mitjà que permetrà calcular els models de radiació solars mensuals.

En referència a la coberta cartogràfica de teulades del cas d'estudi s'obtindrà de les capes *Building* o *BuildingPart*, extretes a través del servei de descàrrega massiva de dades ATOM del Cadastre.

Per a complementar les capes anteriors i possibilitar la construcció d'un *cadastre solar* complet, s'afegirà informació complementaria en forma de capes vectorials. Per una banda, s'afegiran les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic d'aquest àmbit d'estudi. Per afegir, també s'inclourà la georeferenciació de Béns Culturals d'Interès Nacional per permetre avaluar la seva exclusió o inclusió com a immobles aptes per adoptar energies fotovoltaiques. Finalment, s'inclouran els recintes municipals que conformen el cas d'estudi.

2.3 Mètode de treball

Un cop localitzada la informació temàtica que s'emprarà per a l'estudi, s'ha seguit el flux de treball descrit a la figura 4 amb l'objectiu de generar un *cadastre solar* de la província de Tarragona.

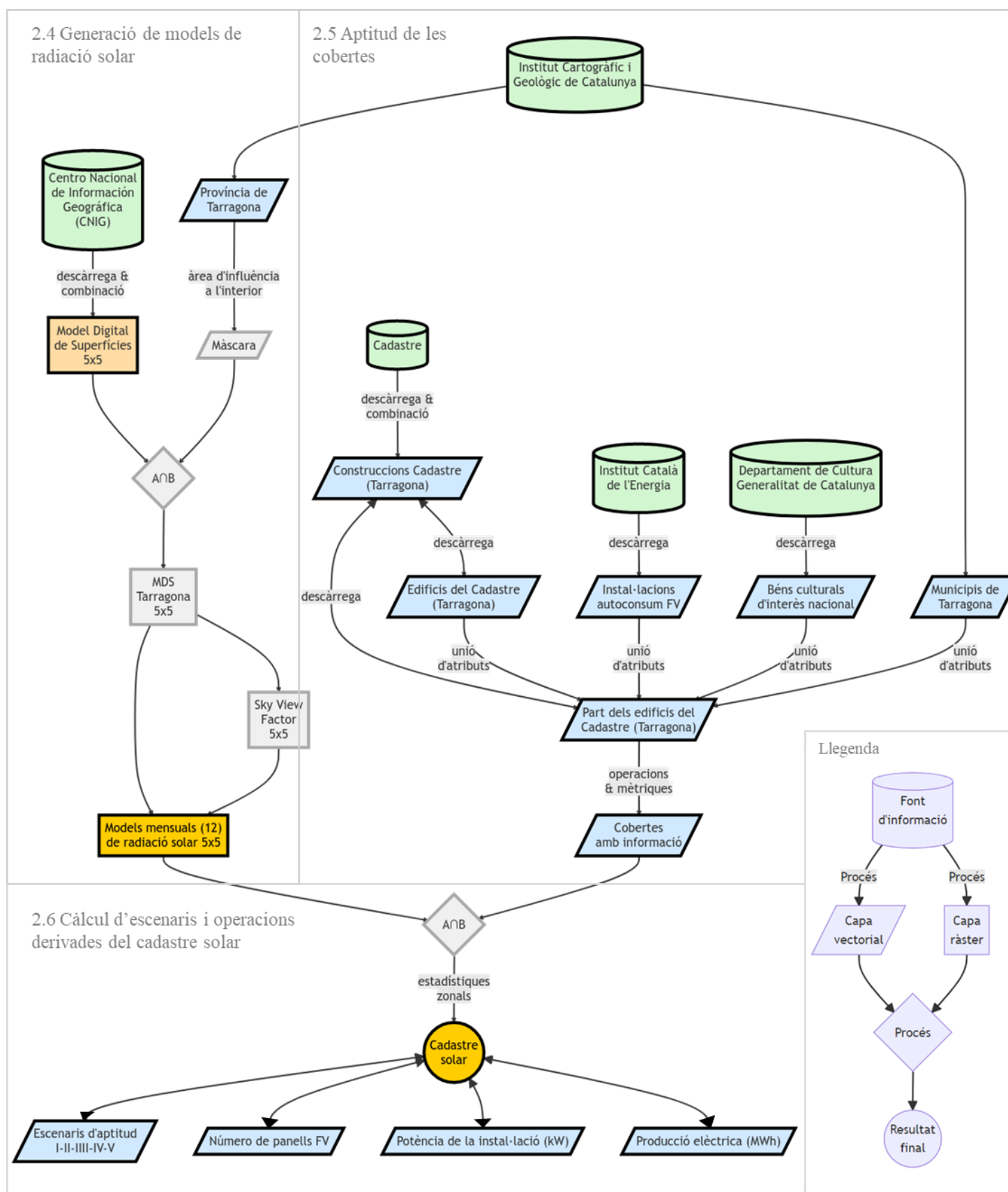


Figura 4. Flux de treball per generar el cadastre solar de la província de Tarragona. Elaboració pròpia.

Si s'observa la figura 4 i la seva llegenda, totes les dades emprades en aquest estudi parteixen d'una font d'informació representada en formes cilíndriques de color verd. De l'extracció de les dades, en aquest cas capes cartogràfiques, es procedeix a la descàrrega i en alguns casos es realitzen operacions de combinació entre fulls ràster, unió d'atributs o creació d'àrees d'influència. També cal destacar que els polígons en forma de rectangle corresponen a capes ràster i les que tenen forma de trapezi són capes vectorials. Com s'observa, els processos que es generen entre diferents capes es representen amb un rombe, i pel resultat final observi's una forma circular representant la base de dades final o el *cadastre solar*. En quant als colors, els grocs simbolitzen la presència d'atributs relacionats amb la radiació solar, mentre que els blaus representen la creació de capes finals i/o no intermitges de les quals se'n deriven atributs que s'incorporen al *cadastre solar*.

En referència al flux de treball que s'ha seguit a l'estudi. S'inicia amb un model digital de superfícies de 5m de resolució a partir del qual es generen dotze models de radiació solar mensuals, (2.4 Models de radiació solar). Tot seguit, s'obtenen les cobertes físiques del cadastre a partir de les quals s'han generat processos de combinació i unió d'atributs amb altres capes vectorials (Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic, Béns Nacionals d'Interès Cultural i Municipis) i operacions per obtenir les característiques físiques de les cobertes per avaluar l'aptitud de les cobertes (2.5 Aptitud de les cobertes). La metodologia segueix amb els resultats de la intersecció de les cobertes de les Parts dels Edificis – *BuildingParts* – i dels Models de Radiació Solar. D'aquesta intersecció es creen cinc escenaris d'aptitud a partir d'expressions detallades a l'apartat 2.6. El *Cadastre solar* es complementa amb el número de panells fotovoltaics potencialment instal·lables per coberta, la potència de la instal·lació i la producció elèctrica estimada. D'aquí en ençà, els camps o atributs que vagin a formar part del *Cadastre solar* presentaran la següent forma: “[*nom de l'atribut*]”.

2.4 Generació de models de radiació solar

2.4.1 Model Digital de Superfícies

Per al càlcul de la radiació solar potencial, s'ha utilitzat un model digital de superfícies derivat de LiDAR anomenat "1a Cobertura" amb una resolució de malla de 5 metres (Figura 5). Aquest model està disponible al Centre de Descàrregues del Centre Nacional d'Informació Geogràfica (Institut Geogràfic Nacional). El sistema de referència espacial utilitzat és l'ETRS89, i les dades es distribueixen en fitxers ESRI ASCII Grid (.asc), dividits en fulls del Mapa Topogràfic Nacional (MTN) a una escala d'1:50.000 (vegeu Figura 5). S'han descarregat un total de 24 fulls que cobreixen tota la demarcació de Tarragona i una zona circumdant de 10 km de vora.

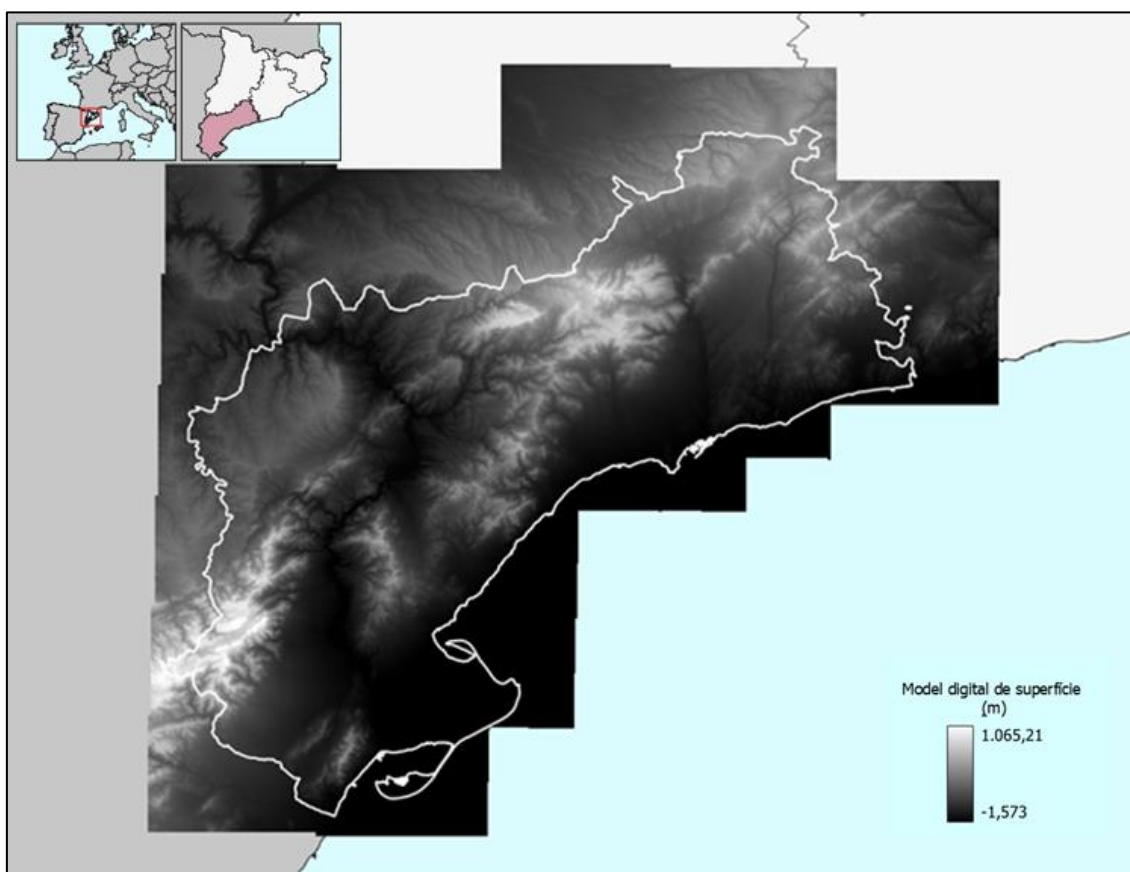


Figura 5. Model digital de superfícies de la província de Tarragona (5m). Font: CNIG (2021).

2.4.1 Models de Radiació Solar

Per a calcular els models de radiació solar derivats del model digital de superfícies, s'ha fet ús del programari SAGA GIS, una eina de Sistemes d'Informació Geogràfica de codi obert, específicament utilitzant el mòdul "Potential Incoming Solar Radiation". En aquest sentit, s'ha generat un codi per **automatitzar** la tasca de creació dels 12 models de radiació solar (Figura 43 de l'Annex). En aquest codi, s'introdueixen els camps que a continuació s'expliquen.

La radiació directa es calcula a partir de la introducció d'una capa, en aquest cas el MDS de la província de Tarragona a la qual se li ha aplicat un buffer de 10 km a l'exterior per a incorporar possibles ombres orogràfiques que s'eludirien d'una altra manera.

A partir d'aquest paràmetre, se'n poden editar d'altres com la modificació de la constant solar (1.367 W/m^2 és el valor per defecte), el flux solar a la part superior de l'atmosfera, l'angle d'il·luminació solar al pendent, la transmitància atmosfèrica (70 és el valor per defecte) i l'obstrucció del cel. En aquest cas s'han triat els valors per defecte que genera el programa a partir d'introduir les coordenades de l'extensió de la demarcació de Tarragona.

Per a generar els 12 models de radiació solar, un per cada mes, s'ha optat per emprar una resolució temporal d'un submodel cada 5 dies, és a dir del primer dia del més cada cinc dies es genera un submodel de radiació solar que s'afegirà al model mensual final., A més la resolució horària és d'1 hora, pel qual significa que aquell dia determinat del qual es genera un submodel a cada hora és produeix el càlcul de radiació solar i després es combinen.

Per a evitar càlculs innecessaris, s'ha ajustat el rang d'hores d'inici i fi de càlcul del model; és a dir, a partir de la sortida de sol més primerenca del mes es trien dues hores anteriors per a començar el càlcul de la radiació solar incident (06:00h el mes de desembre). De la mateixa manera, per la posta de sol, se'n tria la més tardana del mes i se li suma dues hores al model per a que intercepti els últims raigs de llum (20:00h el mes de desembre). L'últim paràmetre d'entrada a definir, és que es generi un arxiu de sortida amb la radiació

solar total incident, la qual resulta de la suma de la radiació solar difusa més la radiació solar directa.

S'ha definit una estratègia per a fer el procés de càlcul dels models amb les resolucions espacials i temporals esmentades anteriorment amb una despesa de temps raonable. És per aquesta raó que tant els càlculs intermedis com el model final s'han realitzat amb una estació de treball computacionalment potent del Departament de Geografia de la Universitat Rovira i Virgili.

Finalment, s'han combinat els models mensuals en ordre de crear un model de radiació anual, aquest els kWh/m²/anual té com a unitat la radiació solar anual (Figura 6).

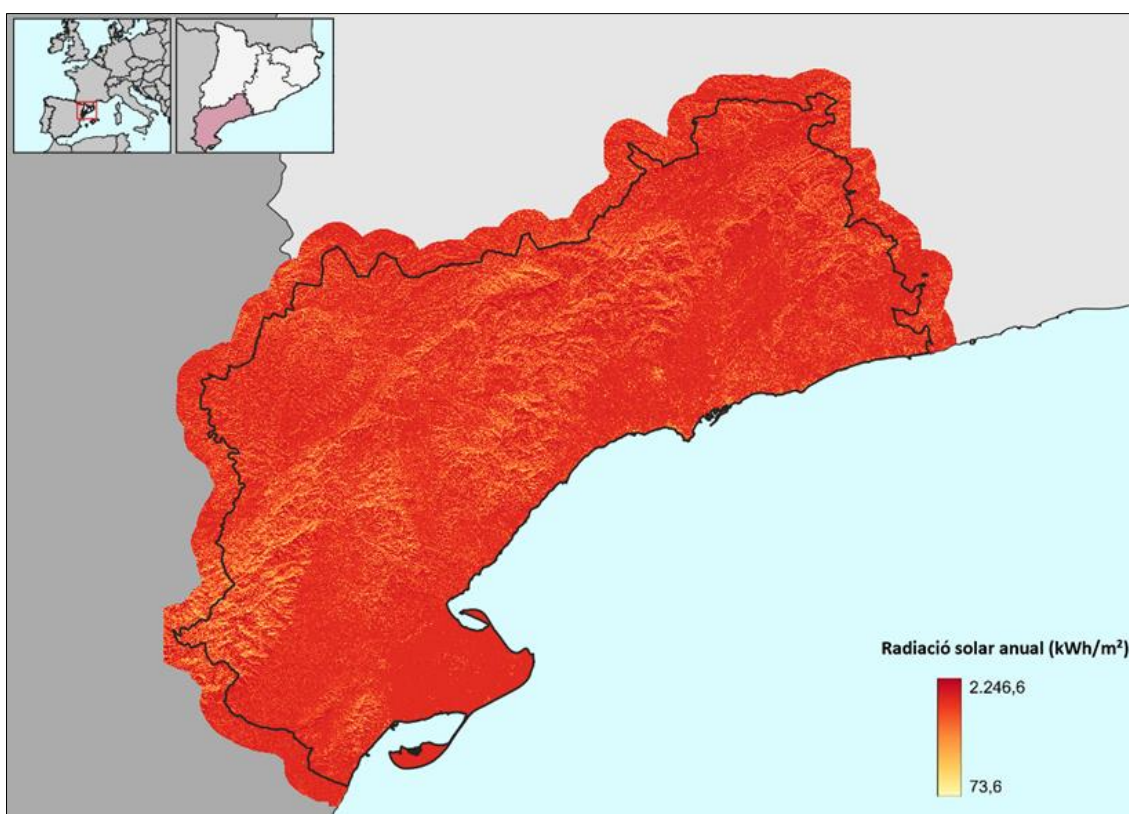


Figura 6. Mapa de la radiació solar total (kWh/m²/any). Font: Elaboració pròpia a partir del CNIG (2021).

És rellevant observar com els models de radiació solar són fidels a les diferències que es generen de les orientacions, pendents i ombres d'obstacles i orografia tant a l'àmbit urbà com a una zona amb relleus accidentats no antropitzada (Figura 7).

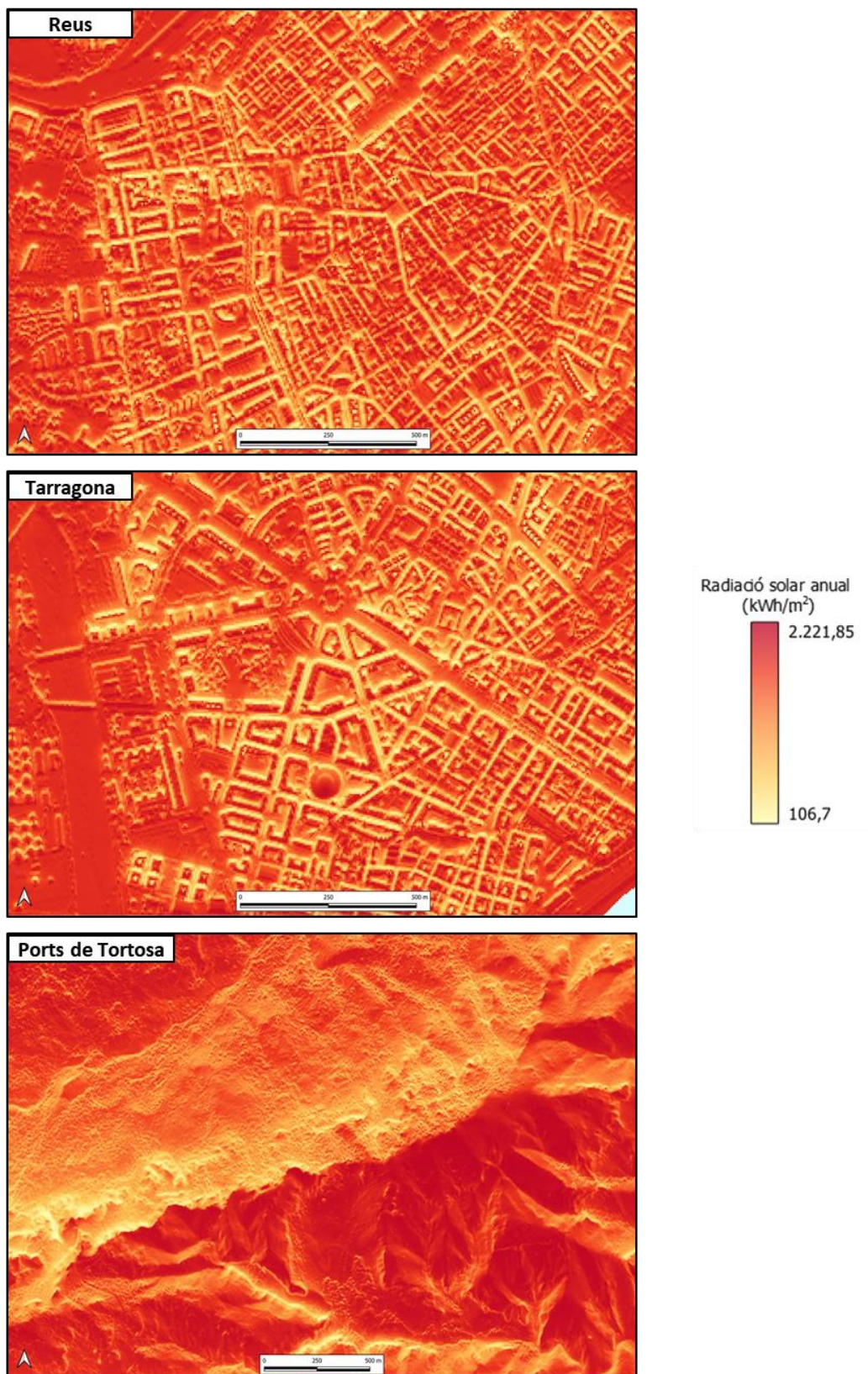


Figura 7. Model de radiació solar total (kWh/m²/any). Model de radiació solar (kWh/m²/any). El cas de l'àmbit urbà de Reus, Tarragona i els Ports de Tortosa. Font: Elaboració pròpia a partir del CNIG, 2021.

A partir d'aquest punt, els models de radiació proporcionen la informació de radiació solar (mensuals i anual) que posteriorment permetrà generar els camps que volem incorporar al *Cadastre solar* per a modelar diferents escenaris d'estimació de producció elèctrica fotovoltaica.

2.5 Aptitud de les cobertes

El suport físic per instal·lar panells fotovoltaics són les cobertes (terrats, teulades, etc.) disponibles dels edificis de la província de Tarragona,. La cartografia relacionada amb les cobertes s'ha extret a partir del servei de descàrrega ATOM del catàleg Spatial Data Infrastructure of Spain (IDEE) de tots els municipis que formen la província de Tarragona. D'aquest servei de descàrrega, es poden obtenir tres capes d'interès (entre d'altres): *Buildings*, *BuildingPart* i *OtherConstruction*.

En relació a les dades descarregades, segons el document d'especificacions "INSPIRE Data Specification on Buildings – Technical Guidelines 3.0" «[...] es considera edifici a tota construcció, superficial o subterrània, amb el propòsit d'allotjar persones, animals i coses, o la producció i distribució de béns o serveis i que siguin estructures permanents al terreny ». La geometria de l'edifici del model INSPIRE obtinguda a partir de les dades del servei de descàrrega ATOM es defineix com un multirecinte que representa « la línia envoltant de totes les construccions amb volumetria sobre rasant de cada parcel·la cadastral, excloent voladissos i terrasses o balcons». En aquest sentit, cal destacar que INSPIRE és una iniciativa de la Comissió Europea el funcionament de la qual es recull a la Directiva 2007/2/CE del Parlament Europeu i del Consell, de 14 de març de 2007, que té com a objectiu la creació d'una Infraestructura de Dades Espacials a Europa, que fa possible que aquesta font sigui compatible a altres països europeus ja que adopten el mateix model.

De les capes descarregades (*Building*, *BuildingPart* i *OtherConstruction*) s'opta per incorporar les *Building* i *BuildingPart* al model:

- **Building**, d'ara en endavant **Edifici**, és l'objecte principal que defineix l'edifici i una sèrie d'atributs definits en un esquema 2D.

- **BuildingPart**, d'ara en endavant **Part d'edifici** és cadascuna de les construccions d'una parcel·la cadastral que té volum homogeni, i poden ser sobre i baix rasant. Disposa dels atributs relacionats amb l'alçada.

A la província de Tarragona, hi ha un total de 349.305 Edificis composts per 855.177 Parts d'Edifici (Figura 8).

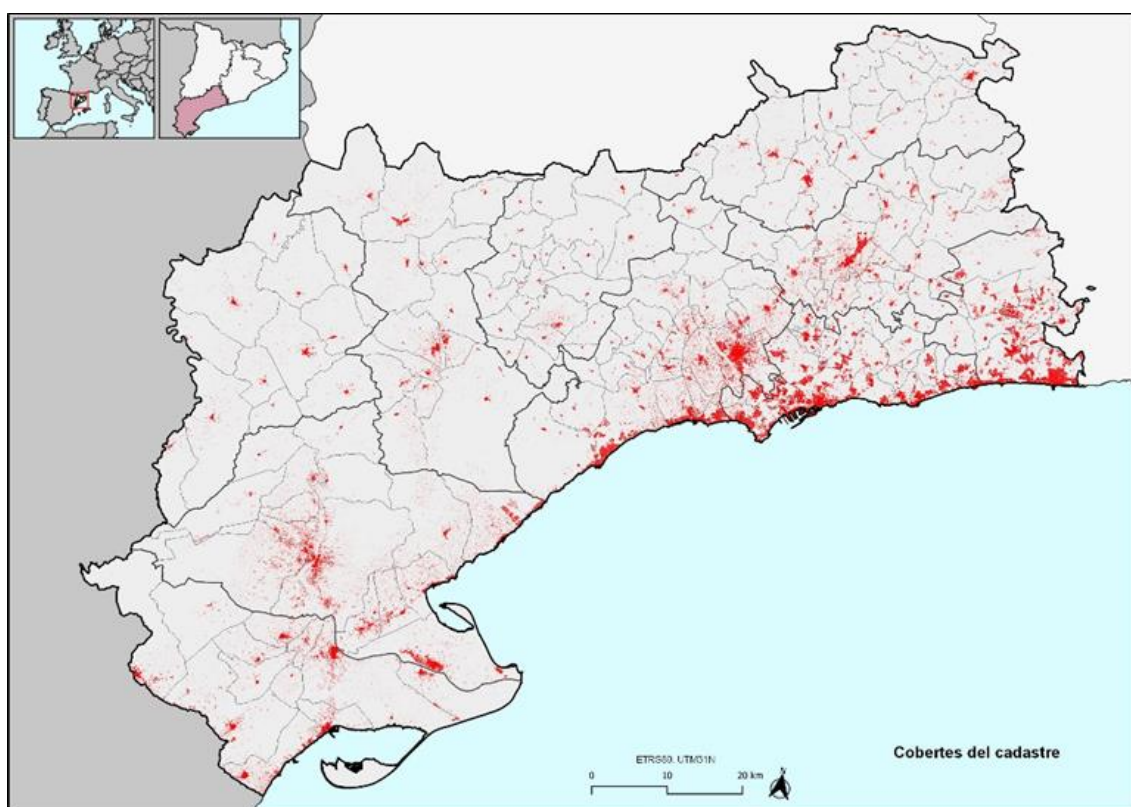


Figura 8. Mapa de les cobertes de les parts d'edifici de la província de Tarragona. Font: Capa *BuildingPart* del servei de descàrrega ATOM del Cadastre (DG del Catastro, 2023).

Aquestes capes incorporen múltiple informació que permet conèixer edifici a edifici dades com el número de pisos per damunt de la planta baixa. En aquest sentit, per a obtenir una primera pinzellada de les característiques del parc d'immobles del cas d'estudi, s'observa que el 61,8% de la superfície de cobertes o teulades estan associades a edificis d'una planta, mentre que tres plantes o més agrupen un 20,9% (Taula 2).

Taula 2. Distribució en superfície i percentatge de les cobertes d'edificis categoritzat pel número de plantes.

Plantes pel damunt del terra	Superfície (km ²)	(%)
0	7,3	11,2
1	40,2	61,8
2	11,3	17,4
3	6	9,2
4 o més	7,6	11,7
Total	65,1	100

Les geometries que estructuraven la coberta física dels Edificis i les Parts d'Edificis tenen característiques diferents. En la majoria de casos, les geometries de Part d'edifici queden solapades i per tant pertanyen a una geometria Edifici (vegeu Figura 9). Cadascuna de les dos capes és descrita per atributs rellevants (Taules 3 i 4).

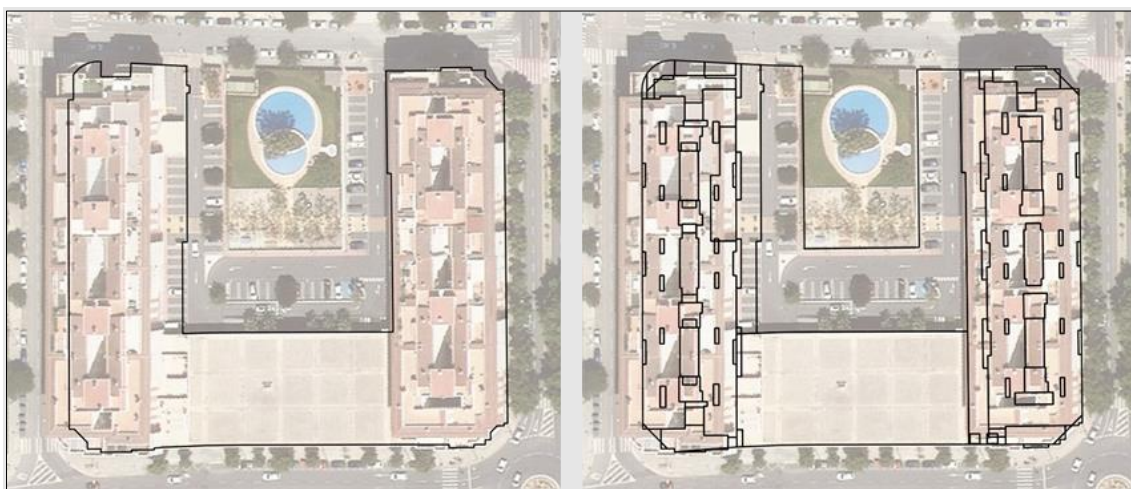


Figura 9. Exemple d'un polígon de la capa Edifici (esquerra) i els polígons de la capa Part d'Edifici (dreta).
Font: Capes *Building* i *BuildingPart* del servei de descàrrega ATOM del Cadastre (DG del Catastro, 2023).

Després d'introduir les cobertes cartogràfiques que s'han triat a partir de la font del Cadastre, cal remarcar les operacions que s'han aplicat a aquestes capes en aquest estudi.

2.5.1 Edifici (*Building*)

Dels Edificis, en primer lloc s'han calculat els camps de l'àrea en m² (“[*bu_area_m2*]”) i dos índex de formes i geometries (“[*bu_shape_index*]” i “[*bu_fractal_dimension*]”). Per a calcular l'àrea s'ha emprat l'expressió (`$area`) a la calculadora de camps del QGIS⁵, un software lliure de SIG (Taula 3).

En referència a l'índex de forma (“[*bu_shape_index*]”) o estadístic SHAPE, aquest resulta al perímetre (m) dividit per l'arrel quadrada de l'àrea del polígon ajustat per una constant (0,25) per a estandarditzar l'índex (Mcgarigal, 2015).

$$\text{SHAPE} = \frac{0.25 p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}}$$

On:

p_{ij} : perímetre del polígon ij

a_{ij} : àrea del polígon ij

Quan el límit s'ajusta a 1 reflecteix polígons quadrats, i com més s'incrementa l'índex més irregular es converteix el polígon (figura 10). Com s'observa a la imatge, la coberta amb una major aptitud per instal·lar plaques fotovoltaïques és la de l'esquerra. En aquest sentit interessa aquells valors menors a un número d'índex a partir del qual les irregularitats del polígon no impedeixin l'adopció d'instal·lacions fotovoltaïques. En aquest cas l'expressió utilitzada per al càlcul del camp és la següent: `((0.25 * perimeter($geometry)) / sqrt(area($geometry)))`.

⁵ Quantum GIS (QGIS) és un programa de visualització, edició i anàlisi de dades que conforma un sistema d'informació geogràfica. Es tracta de programari de codi lliure i multiplataforma, és a dir que es pot modificar i descarregar lliurement i es pot utilitzar amb diversos sistemes operatius.

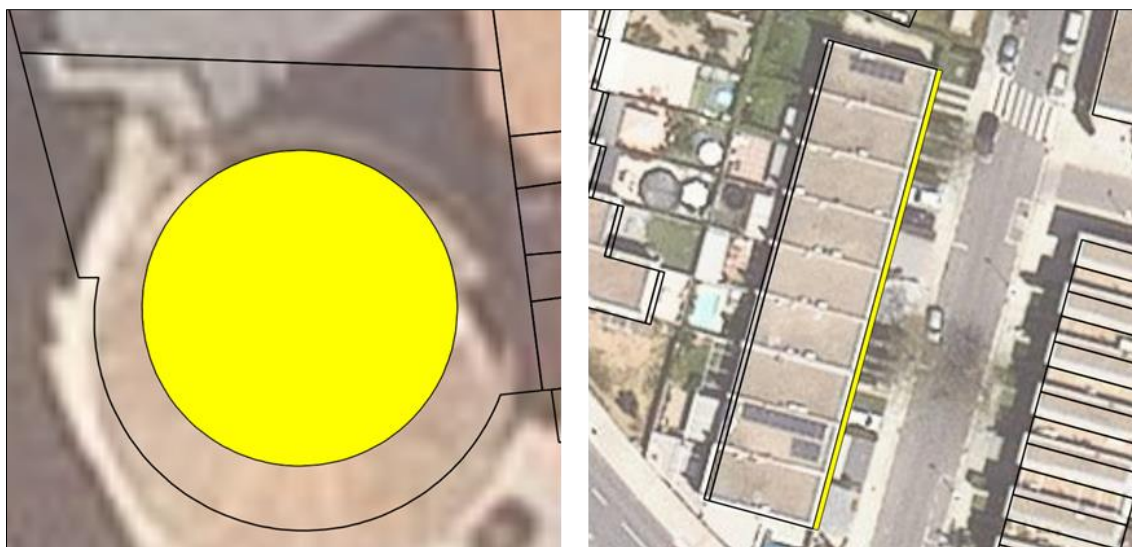


Figura 10. Exemples de polígons amb diferents valors de l'índex SHAPE. Part d'edifici amb índex 1,02 (esquerra). Part d'edifici amb índex 13,13 (dreta).

L'estadístic FRAC o Índex de dimensió fractal (Mcgarigal, 2015), és igual a 2 vegades el logaritme del perímetre del polígon (m) dividit per logaritme de l'àrea del polígon (m). Aquest índex reflecteix la complexitat de les formes a rang d'escales espacials (mida de polígon). Així, com l'índex de forma (SHAPE), aquest càlcul supera una de les principals limitacions de la relació recta perímetre-àrea com a mesura de la complexitat de la forma.

$$\text{FRAC} = \frac{2 \ln(.25 p_{ij})}{\ln a_{ij}}$$

On:

p_{ij} : perímetre del polígon ij

a_{ij} : àrea del polígon ij

Quan FRAC més s'apropa a 1, es tracta de formes de polígon molt simples com quadrats, potencialment aptes per adoptar instal·lacions fotovoltaïques i com més creix l'índex més s'apropa a formes extremadament complexes, estretes i corbades que no serien aptes com

a cobertes per adoptar energies fotovoltaïques. L'expressió de càlcul d'aquest índex és el següent: $(2 * \ln(0.25 * \text{perimeter}(\$geometry)) / \ln(\text{area}(\$geometry)))$.

Les diferències entre polígons amb valors extrems és molt destacable. A l'exemple de la figura 11 l'edifici de l'esquerra seria més apte per instal·lar plaques fotovoltaïques.



Figura 11. Exemples de polígons amb diferents valors de l'índex FRAC. Part d'edifici amb índex 1 (esquerra). Part d'edifici amb índex 16,09 (dreta).

En referència a la resta d'atributs extrets directament de la capa d'Edificis (Taula 3), s'obté el camp identificatiu d'aquell edifici, l'ús dominant de l'edifici, informació relacionada amb les metadades de l'edifici, accés a la fotografia de la façana així com dades relacionades amb l'alta a la base del cadastre. Altres dades que també s'incorporen són l'any d'inici i finalització de la construcció del mateix, en quin estat es situa l'edifici, el número d'immobles de la parcel·la cadastral així com els immobles destinats a l'ús de l'habitatge i el nombre mig i màxim de plantes sobre la rasant.

Per a obtenir el nombre mig i màxim de plantes sobre rasant de l'edifici, s'agafen els valors de les Parts d'edifici que es situen dins del mateix Edifici i es calcula la mitjana

del nombre de pisos sobre la rasant. Per a obtenir el nombre màxim de plantes es selecciona aquella Part d'Edifici amb el màxim número de plantes.

Taula 3. Informació associada a la capa Edifici (Building)

Atribut	Descripció	Exemple
bu_id	Identificador de l'edifici	1
bu_area_m2	Superfície de l'edifici en m2	273,05
bu_shape_index	Índex de forma	1,63
bu_fractal_dimension	Índex de dimensió fractal	1,42
bu_currentUse	Us dominant de l'edifici (1_residential, 2_agriculture, 3_industrial, 4_1_office, 4_2_retail, 4_3_publicServices)	3_industrial
bu_informationSystem	URL amb accés a la consulta i certificació del bé immoble	https://www1.sedecatastro.gob.es/CYCBienInmueble/...
bu_documentLink	URL amb accés a la fotografia de la façana de l'edifici	http://ovc.catastro.meh.es/OVC/ServWeb/OVCWcfLibres/OVCFotoFachada.svc/...
bu_beginLifespanVersion	Data des de quan s'ha donat d'alta a la base de dades del cadastre	2018-06-13T00:00:00
bu_beginning	Any d'inici de construcció	1978-01-01T00:00:00
bu_end	Any de finalització de construcció	2015-01-01T00:00:00
bu_conditionOfConstruction	Valors que representen l'estat de conservació (ruin: ruïnós, declined: deficient, functional: funcional)	funcional
bu_numberOfBuildingUnits	Número d'immobles de la parcel·la cadastral que conté l'edifici	1
bu_numberOfDwellings	Número d'immobles de la parcel·la cadastral que conté l'edifici, destinats a l'us de l'habitatge	1

bu_numberOfFloorsA boveGround_mean	Número mig de plantes d'entre totes les parts d'edificis (buildingparts) de la mateixa unitat d'edifici (building)	2
bu_numberOfFloorsA boveGround_max	Número màxim de plantes d'entre totes les parts d'edificis (buildingparts) de la mateixa unitat d'edifici (building)	2

2.5.2 Part d'edifici (*BuildingPart*)

El *cadastre solar* que s'obtindrà al final dels processos detallats a la metodologia, té com a estructura cartogràfica bàsica les la capa *BuildingPart* o Part d'Edifici. Si recordem aquesta està composta de 855.177 polígons o cobertes.

Els camps rellevants d'aquesta capa (vegeu Taula 4) són en primer lloc l'identificador del polígon així com un identificador que prové de la base de dades del cadastre. Del camp es pot obtenir també l'identificador de l'Edifici al qual pertany la Part d'Edifici. Per continuar s'ha extret també la informació del número de plantes per sobre la rasant així com l'alçada de plantes sobre la rasant en metres i que dona el número de plantes per sota la rasant de la part d'edifici.

A banda d'aquesta informació, s'ha procedit a calcular informació estadística en base a les geometries del polígon. En aquest sentit, s'ha calculat l'àrea del polígon, l'índex de forma, l'índex de dimensió fractal, i l'àrea de l'interior de la coberta.

Els tres primers camps mencionats han estat calculats utilitzant el mateix mètode que amb els polígons d'Edificis, així i tot, s'ha creat un nou camp (“[bp_core_area_1m]”) de la qual interessa per a posteriori disposar de la superfície apta de la coberta. Aquest camp calcula l'àrea de la coberta excloent tota la part exterior de la coberta en un metre de distància entre l'interior i el límit de la mateixa. Els motius per a realitzar aquest càlcul és deuen a (1) que la part externa de la coberta pot ser considerada com un àrea de seguretat per a la instal·lació i operacions de manteniment i (2) és una zona descartada per a minimitzar l'efecte que les alçades ténen en els càlculs a partir dels MDS.

Taula 4. Informació associada a la capa Part d'edifici (*BuildingPart*)

Atribut	Descripció	Exemple
bp_id	Identificador de la part de l'edifici	1
bp_gml_id	Objecte GML de capçalera on es defineix l'esquema 2D extès de l'edifici.	ES.SDGC.BU.190740 1VK4810H_part1
bp_area_m2	Superfície de la part d'edifici en m ²	2340
bp_core_area_1m	Superfície del polígon en m ² resultant d'extreure 1m de la part exterior de la coberta	1760
bp_shape_index	Índex de forma	1.4
bp_fractal_dimension	Índex de dimensió fractal	2.1
bp_numberOfFloorsAboveGround	Número de plantes sobre rasant	11
bp_heightBelowGround	Altura de plantes sota rasant en metres.	3
bp_numberOfFloorsBelowGround	Número de plantes sota rasant	1

2.5.3 Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic

Per a complementar la base de dades del *cadastre solar*, s'ha considerat de descatat interès incloure les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic de Tarragona a partir de les dades publicades per l'Institut Català de l'Energia (ICAEN, 2023b).

L'ICAEN ofereix una capa cartogràfica georeferenciada de les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic. No obstant això, cal remarcar que les instal·lacions en la majoria de casos no es troben ben georeferenciades. En aquest sentit **s'han hagut de relocalitzar 3.332 instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic de la província de Tarragona per a ubicar-les adequadament sobre cobertes amb instal·lacions fotovoltaiques existents (Figures 12 i 13)**. Així i tot, hi ha un nombre destacat d'instal·lacions que no han pogut ser localitzades sobre cobertes.

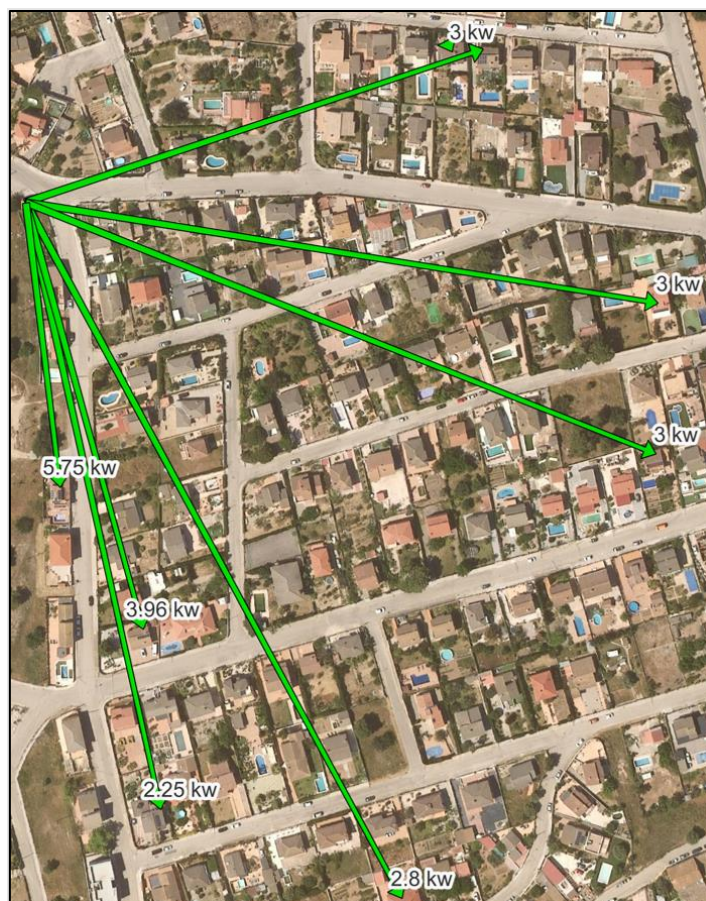


Figura 12. Exemple I de l'exercici de relocalització de les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic. La ubicació inicial de les instal·lacions es situava a l'extrem superior esquerra de la figura; d'aquest punt es van relocalitzar les plaques FV en funció de la potència-mida observada a la ortofoto. Font: ICAEN (2023b).

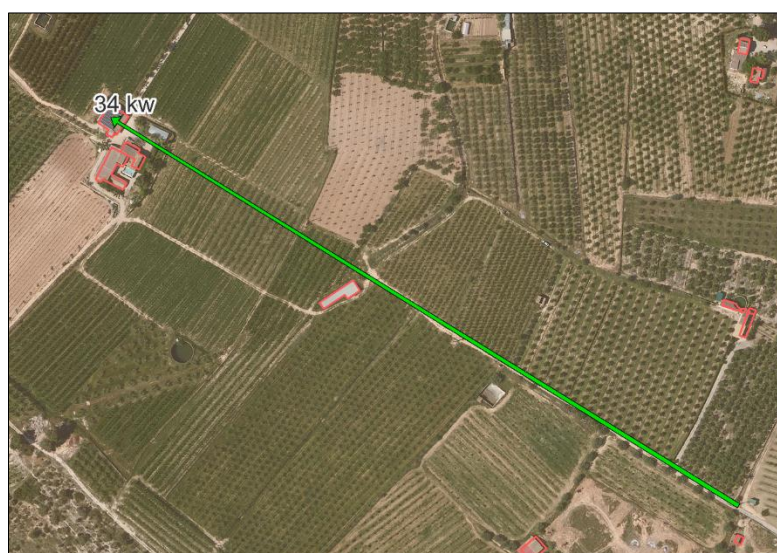


Figura 13. Exemple II de l'exercici de relocalització de les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic. La ubicació inicial de la instal·lació es situava a l'extrem inferior dret de la figura i es reubica a l'extrem superior esquerra de la figura en funció de la potència-mida observada a la ortofoto. Font: ICAEN (2023b).

Els camps incorporats al Cadastre Final per part d'aquesta capa són els següents (Taula 5). El camp “[sc_id]” és l'identificador de la instal·lació; “[sc_interval]” és l'interval de potència de la instal·lació fotovoltaica; “[sc_beginlife]” incorpora la data que es va donar d'alta la instal·lació; “[sc_type]” que destaca de quin tipus d'instal·lació es tracta; i “[sc_location]” el qual destaca sobre quin tipus de localització s'assenta la instal·lació.

Taula 5. Informació associada a la capa d'instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic.

Atribut	Descripció	Exemple
sc_id	Identificador	7048
sc_interval	Potència de la instal·lació en interval	Pot <= 5 kW
sc_beginlife	Data des de quan s'ha donat d'alta a la base de dades del cadastre	22/02/2022
sc_type	Tipus d'instal·lació	Compensació d'excedents
sc_location	Tipus de localització	Edifici

2.5.4 Béns culturals d'interès nacional (BCIN)

Els Béns d'Interès Cultural (BIC) són una figura de protecció del patrimoni històric de l'estat espanyol que segons registres del 2017, es van comptabilitzar un total de 30.400 béns declarats. Segons la LLEI 9/1993, de 30 de setembre, del Patrimoni Cultural Català, els béns més rellevants del patrimoni cultural català, tant mobles com immobles, han de ser declarats d'interès nacional pel Govern de la Generalitat de Catalunya. Els béns immobles declarats Béns Culturals d'Interès Nacional (BCIN) es classifiquen en: monument històric; conjunt històric; jardí històric; lloc històric; zona d'interès etnològic; zona arqueològica i zona paleontològica. Aquests mobles i immobles han de ser inscrits al Registre de Béns Culturals d'Interès Nacional, en el qual també s'ha d'anotar preventivament la incoació dels expedients de declaració (Departament de Cultura, 2023).

És important incorporar aquesta informació ja que cal avaluar el fet de que una coberta estigui qualificada com a BCIN. Les cobertes amb aquestes característiques poden ser motiu d'exclusió en algun dels escenaris d'aptitud que es vulguin detallar. No obstant això, també es podria contemplar la instal·lació de panells fotovoltaics sempre i quan no afectin visualment ni estructuralment l'edifici. En referència als registres de BCIN del 2017, a la província de Tarragona se'n contabilitzen 382 (vegeu la Figura 14).

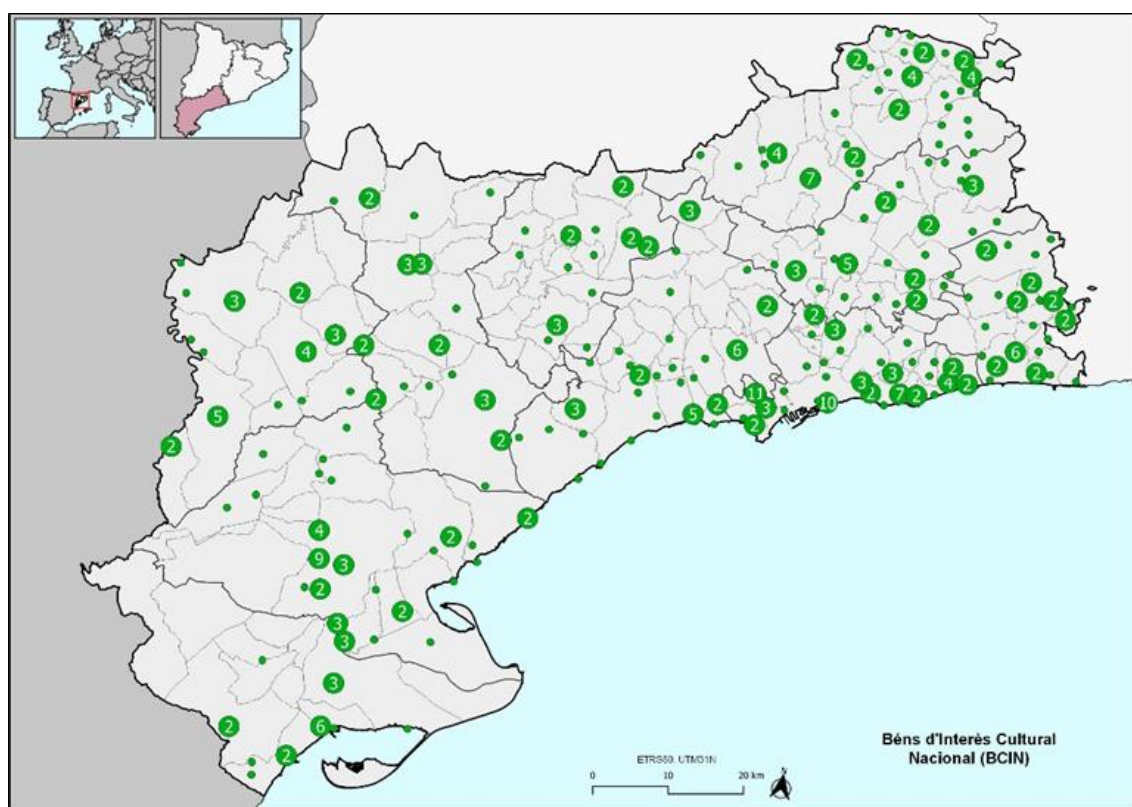


Figura 14. Béns culturals d'interès nacional (BCIN). Font: Institut d'Estadística de Catalunya (IEC, 2023).

Aquesta informació ha estat despresa de l'Institut d'Estadística de Catalunya (IEC, 2023) la qual ha pogut ser cartografiada a partir de l'extracció de les coordenades del registre. En aquest sentit, el camp seleccionat d'aquesta base de dades és el nom del BCIN, el qual s'ha incorporat al cadastre final com a “[*bic_name*]” (Taula 8).

Taula 6. Informació associada als Béns Culturals d'Interès Nacional.

Atribut	Descripció	Exemple
bic_name	Nom del Bé Cultural d'Interès Nacional	Torre del Delme (Vila-seca) RI-51-0006791

2.5.4 Municipis

La base cartogràfica dels recintes municipals s'ha sostret del repositori de cartografia administrativa de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. En concret, és tracta d'una capa vectorial amb polígons que delimiten els recintes administratius dels 182 municipis de la demarcació de Tarragona. D'aquesta capa, en són rellevants els camps “[muni_id]” que incorpora el codi identificador del municipi i “[muni_name]” amb la nomenclatura del mateix (Taula 7).

Taula 7. Informació associada als municipis.

Atribut	Descripció	Exemple
muni_id	Identificador del municipi	34094343171
muni_name	Nom del municipi	Vila-seca

2.6 Càlcul d'escenaris i operacions derivades del *Cadastre solar*

L'elaboració final del *cadastre solar* va introduïda per tres operacions. En primer lloc, es realitza una anàlisi d'estadístiques zonals entre els Models de Radiació Solar i les Parts d'Edificis. Tot seguit, es crearan els camps de producció elèctrica estimada, el número de plaques i la potència instal·lable. Per a finalitzar, es definirà el càlcul dels escenaris d'aptitud de les cobertes.

2.6.1 Estadístiques zonals entre els Models de Radiació Solar i les Parts d'Edificis

Partint de la obtenció de 12 models de radiació solar mensual amb un pes estimat de 2,76 GB cadascun d'ells i una resolució espacial de 5 metres, és primordial encreuar les dades de radiació amb una capa de polígons, en aquest cas, la capa de Parts d'Edificis del Cadastre (855.177 cobertes de parts d'edificis a la província de Tarragona) a partir d'una funció anomenada Estadístiques Zonals. El mètode per a generar les estadístiques zonals ha estat la següent eina "Grid Statistics for Polygons" del software SAGA GIS.

Tot seguit, amb l'encreuament de les dades de radiació mensuals, es generen els arxius que incorporaran les estadístiques zonals mensuals. També es crea automàticament la suma dels arxius mensuals per a obtenir les estadístiques amb informació de la radiació solar total anual sobre les cobertes de la província Tarragona.

De les estadístiques zonals s'associen a la base de dades atributs com el número de cel·les completes sobre cadascuna de les cobertes. En aquest cas píxels de 5x5 metres que solapen amb la coberta ("solrad_year_cells" i "solrad_dec_cells") que degut a que el MDS d'origen és el mateix pels dos models, el número de cel·les és el mateix. També s'ha associat el camp "solrad_year_sum_kwh" i "solrad_dec_sum_kwh" dels quals s'associa la informació de la radiació solar total incident de la coberta, i finalment s'introdueix un camp per període d'estudi (anual i desembre) "solrad_year_mean_kwh" i "solrad_dec_mean_kwh" amb informació sobre la radiació solar mitjana per metre quadrat de cada coberta (vegeu Taula 8).

Taula 8. Informació associada als models de radiació solar.

Atribut	Descripció	Exemple
solrad_year_cells	Número de píxels de les cobertes	2
solrad_year_sum_kwh	Suma de la radiació total de la coberta (kWh)	10.462,42
solrad_year_mean_kwh	Mitjana de la radiació total de la coberta (kWh/m ² /any)	1.354,03

solrad_dec_cells	Número de píxels de les cobertes	2
solrad_dec_sum_kwh	Suma de la radiació de desembre de la coberta (kWh)	220,01
solrad_dec_mean_kwh	Mitjana de la radiació de desembre de la coberta (kWh/m ² /any)	28,47

2.6.2 Càlcul del potencial de producció elèctrica, número de plaques solars i potència instal·lable.

En aquest apartat, s'abordarà la metodologia per a realitzar els tres següents camps: “[*prod_mwh_1_formula*]”, “[*num_of_sun_panels*]” i “[*power_kw*]” (Taula 9).

Taula 9. Informació associada al potencial de producció elèctrica, número de plaques solars i potència instal·lable.

Atribut	Descripció	Exemple
power_kw	Potència estimada d'instal·lació FV per coberta (kW)	12,6
num_of_sol_panels	Número estimat de plaques FV per coberta	36
prod_mwh_1_formula	Producció elèctrica FV estimada per coberta (MWh/any)	3,84

En primer lloc, al primer camp es calcula la producció elèctrica estimada d'una coberta amb la instal·lació de panells fotovoltaics. S'ha considerat l'àrea central de les cobertes de les parts d'edifici - “[*bp_core_area_1m*]” com a superfície apta de la coberta per a computar a l'equació de l'estimació del potencial.,

Tot seguit, s'ha seleccionat un model de panell solar fotovoltaic de 350W ja que les plaques solars més comunes per a ús residencial solen tenir una potència d'entre els 300

i 400W. No obstant això, en aquest estudi es valora que existeixen plaques de major i menor potència, tot depenent de factors com la mida, la tecnologia utilitzada, el tipus d'instal·lació, la finalitat de la instal·lació, etc.

Un altre atribut clau per estimar la producció és la radiació solar total anual de les cobertes “[solrad _year_mean_kwh]”. Amb una àrea de coberta apta per instal·lar panells fotovoltaics (“[bp_core_area_1m]”); una ràtio de potència per superfície de coberta (66W/m²); una potència de panell fotovoltaic (350W); un valor de radiació solar total anual (KWh/m²/any) i l'aplicació d'un coeficient de reducció d'eficiència de les plaques (20%) i de les instal·lacions (80%) (Martin, 2016), només falta definir l'equació per estimar el valor de producció elèctrica a partir de la tecnologia fotovoltaica d'una coberta.

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 resulta com es detalla a continuació. L'Equació (1) s'aplica llavors a totes les parts d'edificis. Després d'això, els resultats poden ser agregats per edificis, recintes administratius, o com sigui necessari (Taula 10).

Taula 10. Procediment per calcular la producció estimada d'energia elèctrica fotovoltaica.

$$E = \left(\frac{A \cdot r}{p} \right) \cdot a \cdot H \cdot PR \cdot 0.001 \quad (1) \text{ on:}$$

E Energia (MWh)

A Àrea total de la coberta (m²)

r Relació de la potència instal·lada per unitat d'àrea (66 W/m²)

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

A Àrea d'un panell solar (2 m^2).

H Radiació solar mitjana anual en panells inclinats ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{any}$). En el nostre estudi, les ombres s'inclouen a través de SVF.

PR Relació de rendiment o eficiència general., Es considera eficiència fotovoltaica (FVe) i eficiència de circuit (Ce). Així, $0,2 \text{ FV e} \cdot 0,8 \text{ Ce} = 0,16 = 16\%$

Exemple per una coberta de 1.000 m^2 emprant un panell FV de 350W amb una eficiència global del 16% i una radiació solar mitjana anual de $2.000 \text{ kWh}/\text{m}^2$:

$$E = (1.000\text{m}^2 \cdot 66\text{W}/\text{m}^2) / 350\text{W} \cdot 2 \text{ m}^2 \cdot 2.000\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot 0,16 \cdot 0,001$$

$$E = 120,7 \text{ MWh}$$

Per continuar, l'atribut per estimar el nombre de panells fotovoltaic ue podrien instal·lar-se en una coberta - “[num_of_sun_panels]” - parteix de les mateixes premisses de la fórmula anterior. Així doncs, amb una potència de panell de 350W , una coberta apta per a instal·lar els panells i una ràtio potència/superfície de coberta de $66\text{W}/\text{m}^2$ es procedeix a calcular el nombre de panells en la manera representada a la taula 11.

Taula 11. Procediment per calcular el número de panells FV estimats.

$$n_p = ((A \cdot r) / p) \text{ (2) on:}$$

n_p Número de panells FV (350W)

A Àrea total de la coberta (m^2)

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

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

Amb els mateixos criteris que hem aplicat a l'exemple anterior, podem il·lustrar un exemple de càlcul de número de plaques a continuació:

$$E = (1.000m^2 \cdot 66W/m^2) / 350W$$

$$E = 188,57.$$

En aquest cas, l'atribut "[num_of_sun_panels]" té aplicat un truncament per decimals, pel que en aquest exemple serien 188 panells fotovoltaics.

Per finalitzar, la potència de la instal·lació fotovoltaica d'una coberta és calcula a partir de multiplicar el número de plaques instal·lables sobre una coberta per la potència de la placa. La fórmula seria la que s'observa a la taula 12.

Taula 12. Procediment per calcular la potència instal·lada estimada.

$$P = n_p \cdot 350 \cdot 0,001 \text{ (3) on:}$$

P Potència (kW)

n_p Número de panells FV (350W)

Aplicant l'exemple anterior, una instal·lació FV amb 188 panells solars tindria una potència de 65,8 kW.

2.6.3 Escenaris d'aptitud

A partir dels camps que s'han anat incorporant a la capa del *Cadastre solar*, s'ha procedit a la creació de cinc escenaris – de menys restrictiu (I) a més restrictiu (V) - per a valorar l'aptitud de les cobertes per adoptar instal·lacions fotovoltaïques. Aquests escenaris contemplen un seguit de filtres. Es parteix d'una xifra potencial de cobertes disponibles que s'anirà reduint filtre per filtre fins a arribar al final del procés de càlcul de l'escenari a un nombre determinat de cobertes (menor a l'inicial).

L'ordre dels filtres ha estat seleccionat des d'aquells que descartin més cobertes a aquells que en descartin menys. Per a fer-se una idea del que s'aconsegueix amb l'aplicació de filtres consecutius observi's la Figura 15. Aquesta figura - gràfic d'embut - reproduïx el potencial de radiació solar incident en un primer nivell. A continuació, mitjançant l'aplicació de filtres, introduïts anteriorment i variables segons escenaris, el potencial

radiatiu disminueix fins arribar a l'esglauó més baix. En aquest últim esglauó vindria representat tot aquell potencial (a partir de cobertes aptes per tots els filtres plantejats per escenaris) que segons l'escenari plantejat seria apte per a l'aprofitament fotovoltaic. Com s'observa, la variable que es situa dins dels esgalons de la figura té com a unitat els GWh. Això és deu a que s'ha seleccionat el sumatori de la radiació solar incident del conjunt de cobertes que són aptes pel filtre que defineix l'esglauó.

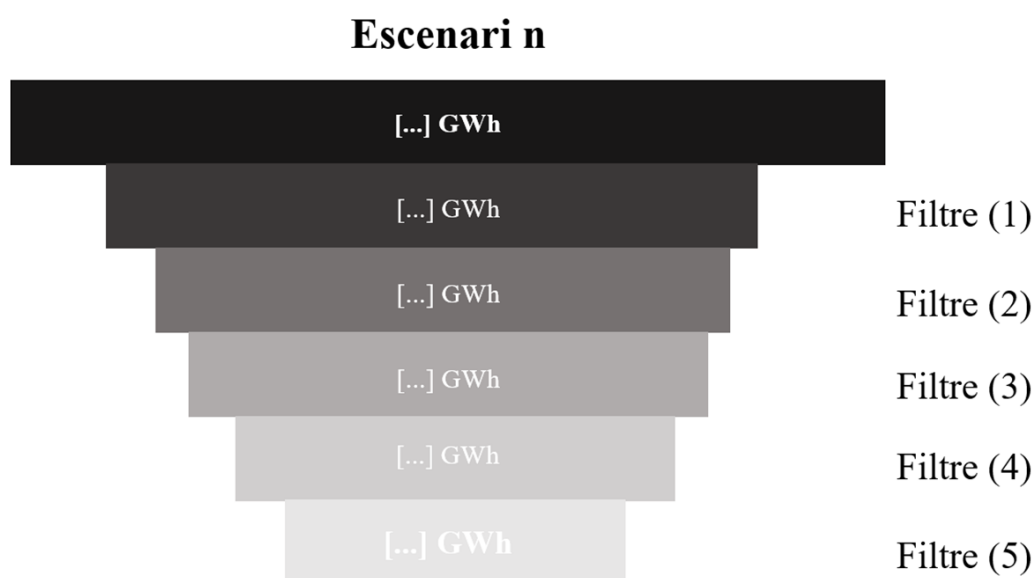


Figura 15. Gràfic d'embut simbolitzant el model de definició dels filtres i escenaris plantejats.

Els filtres que defineixen els escenaris s'estructuren en cinc parts:

1. Filtre de cobertes per característiques físiques:

El primer filtre és comú per a tots els escenaris. En primer lloc, s'han descartat els edificis i parts d'edificis amb formes complexes (índex de forma i índex de dimensió fractal); amb valors d'índex de forma superior a 1 però inferior al 4 i valors de dimensió fractal superiors a 1 i inferiors al 2.

En segon lloc, s'han seleccionat els edificis funcionals, és a dir, s'han descartat els que estan en estat ruïnós o delicat.

En tercer lloc, s'han descartat cobertes amb una àrea central, una vegada excloses les mínimes legals que s'han de respectar per raons de seguretat i manteniment de les instal·lacions, menors a 10 m² així com els edificis subterranis, és a dir edificis inferiors a una primer planta.

Per continuar, s'han descartat aquelles parts d'edificis que són patis i altres parts dels edificis que estan per sota de l'alçada mitjana de l'edifici, independentment de la radiació solar potencial estimada.

2. Filtre de l'edat de l'edifici:

Al primer escenari s'han inclòs tots aquells superiors al 1.800; al segon el 1.850; el tercer el 1.900 i el quart i cinquè el 1.950. L'escenari IV i V comparteixen data ja que a l'agafar l'any 2.000 s'ha comprovat que es descartaven massa cobertes (un 75% aproximadament).

3. Filtre de radiació solar mitjana desembre.

El tercer filtre és la radiació solar mitjana del mes de desembre. A l'escenari I s'ha triat com a valor de tall els 30 kWh/m²; 40 a l'escenari II; 50 a l'escenari III; 60 a l'escenari IV; i 70 a l'escenari V. S'han definit intervals basats en quartils.

4. Filtre de radiació solar mitjana anual.

El quart filtre correspon a la radiació solar mitjana anual, és a dir, en tots aquells edificis on la seva coberta no es trobi per sobre dels següents valors no computa en l'escenari corresponent. En concret el punt de tall a l'escenari I són els 800 kWh/m²; 900 kWh/m² a l'escenari II; 1.000 kWh/m² a l'escenari III; 1.100 a l'escenari IV i 1.200 a l'escenari V.

5. Filtre dels BCIN.

Aquest filtre inclou o exclou els Béns Culturals d'Interès Nacional., En concret, s'inclouen com a cobertes aptes per a l'adopció d'instal·lacions fotovoltaïques a l'escenari I – menys restrictiu, mentre que a la resta d'escenaris aquests Béns es descarten de l'equació.

A partir de la definició de filtres i per tant d'escenaris, s'ha generat un conjunt d'expressions (Taules 38, 39, 40, 41 i 42 de l'Annex) que s'apliquen a la capa del Cadastre Final per a seleccionar en diferents camps quines cobertes són aptes (TRUE) o no ho són (FALSE) per a computar per un escenari en concret. A banda, s'ha generat un camp "num_of_scen_true" al Cadastre Final relacionat amb el número de vegades que surten escenaris aptes (TRUE) per a una coberta determinada, generant d'aquesta manera una numeració del 0 al 5. D'aquesta manera si aquest camp té un 0 significa que la coberta en cap cas és apta, i si té un V vol dir que ha anat aprovant l'aptitud de cadascun dels escenaris, començant pel primer i acabant pel cinquè (vegeu la Taula 13).

Taula 13. Informació associada als escenaris d'aptitud de les cobertes.

Atribut	Descripció	Exemple
scenario_1	Aptitud per l'escenari I	true
scenario_2	Aptitud per l'escenari II	false
scenario_3	Aptitud per l'escenari III	false
scenario_4	Aptitud per l'escenari IV	false
scenario_5	Aptitud per l'escenari V	false
num_of_scen_true	Número d'escenari aptes	1

3. Resultats

Com a resultat d'aquest treball s'ha obtingut una base de dades en format *Geopackage* amb informació de detall sobre totes les cobertes dels edificis de la província de Tarragona. La base de dades agrupa dades d'avaluació de l'aptitud de les cobertes, la producció elèctrica estimada, el número de panells solars, potència de la instal·lació i la comparació entre les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic existents amb la informació produïda de les cobertes.

3.1. Estructura del *Cadastre solar*

El principal resultat de l'estudi, és un *Cadastre solar*, entès principalment com la capa de parts d'edificis amb un recull d'informació i operacions provinent de diverses fonts. Per a no perdre la traçabilitat i origen de les fonts d'informació que s'han anat incorporant a la capa de parts d'edificis, s'ha creat un paquet tant amb tota la informació d'origen i derivada – model digital de superfícies, model de radiació solar anual, les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaics, els edificis (*Building*), els Béns Culturals d'Interès Nacional i els municipis.

Taula 14. Estructura del *cadastre solar*.

Capa	Identificador	Característiques	Descripció
Model digital de superfície	<i>mds</i>	148.141.164 píxels	Capa ràster del model digital de superfície de la província de Tarragona i voltants. Unitats de la capa en metres i una resolució és de 5x5m.
Model de radiació solar anual	<i>tot_solrad_year</i>	117.634.975 píxels	Capa ràster del de radiació solar anual., Unitats en kWh/m2/any. Resolució és de 5x5m.

Parts d'edificis	<i>buildingPart</i>	855.177 objectes	Capa vectorial de les cobertes en parts d'edificis de la demarcació. És el suport cartogràfic del <i>Cadastre solar</i> la informació del conjunt de capes.
Edificis	<i>building</i>	272.161 objectes	Capa vectorial de les cobertes en edificis.
Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic	<i>fv_sci</i>	3.332 objectes	Capa vectorial de les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic relocalitzades.
Béns Culturals d'Interès Nacional (BCIN)	<i>bcin</i>	382 objectes	Capa vectorial en forma de punts dels Béns Culturals d'Interès Nacional.,
Municipis	<i>municipalities</i>	184 objectes	Recintes administratius municipals de la província de Tarragona.

El pes total del *Geopackage* és de 3,48 GB, sense comptar amb els 12 models de radiació solar potencial mensuals, així com els resultats intermedis. Segons els registres recollits durant els càlculs, els processos automatitzats han durat 2.390 minuts (40 hores).

3.2 Exemple de *Cadastre solar*

La informació completa i detallada de cadascuna de les cobertes de la província de Tarragona és un dels principals resultats del present estudi. A la Taula 15 es pot distingir la informació associada a la base de dades del *cadastre solar* de la coberta del castell de la Bisbal del Penedès. Així mateix, a la Figura 16 es pot visualitzar el model de radiació solar anual (kWh/m²) i l'interval de radiació solar mitjana de la coberta d'exemple (en aquest cas 1.760,13 kWh/m²).



Figura 16. Model de radiació solar total en kWh/m²/any (esquerra) i radiació mitjana de la coberta en intervals en kWh/m²/any (dreta). El cas d'una coberta d'una part d'edifici al municipi de la Bisbal del Penedès.

Taula 15. Informació completa de la base de dades del *cadastre solar*. El cas d'una coberta d'una part d'edifici al municipi de la Bisbal del Penedès.

Atribut	Descripció	Dades
Informació associada a Parts d'edificis (<i>BuildingPart</i>)		
bu_id	Identificador de l'edifici	142296
bu_area_m2	Superfície de l'edifici en m ²	420,1403525
bu_shape_index	Índex de forma	1,58719917
bu_fractal_dimension	Índex de dimensió fractal	1,571958499
bu_currentUse	Us dominant de l'edifici (1_residential, 2_agriculture, 3_industrial, 4_1_office, 4_2_retail, 4_3_publicServices)	1_residential
bu_informationSystem	URL amb accés a la consulta i certificació del bé immoble	https://www1.sedecatastro.gob.es/CYCBienInmueble/OVCListaBienes.aspx?rc1=3313704&rc2=C7731C
bu_documentLink	URL amb accés a la fotografia de la façana de l'edifici	http://ovc.catastro.meh.es/OVCServWeb/OVCWcfLibres/OVCFotoFachada.svc/RecuperarFotoFachadaGet?ReferenciaCatastral=3313704CF7731C
bu_beginLifespanVersion	Data des de quan s'ha donat d'alta a la base de dades del cadastre	2017-09-13T00:00:00

bu_beginning	Any d'inici de construcció	1900-01-01T00:00:00
bu_end	Any de finalització de construcció	1900-01-01T00:00:00
bu_conditionOfConstruction	Valors que representen l'estat de conservació (ruin: ruïnós, declined: deficient, functional: funcional)	functional
bu_numberOfBuildingUnits	Número d'immobles de la parcel·la cadastral que conté l'edifici	1
bu_numberOfDwellings	Número d'immobles de la parcel·la cadastral que conté l'edifici, destinats a l'us de l'habitatge	1
bu_numberOfFloorsAboveGround_mean	Número mig de plantes d'entre totes les parts d'edificis (buildingparts) de la mateixa unitat d'edifici (building)	2
bu_numberOfFloorsAboveGround_max	Número màxim de plantes d'entre totes les parts d'edificis (buildingparts) de la mateixa unitat d'edifici (building)	2
Informació associada a Edificis (<i>Building</i>)		
bp_id	Identificador de la part de l'edifici	459787
bp_gml_id	Objecte GML de capçalera on es defineix l'esquema 2D extès de l'edifici.	ES.SDGC.BU.3313704CF7731C_part4
bp_area_m2	Superfície de la part d'edifici en m ²	73,6757
bp_core_area_1m	Superfície del polígon en m ² resultant d'extreure 1m de la part exterior de la coberta	41,699
bp_shape_index	Índex de forma	1,1822
bp_fractal_dimension	Índex de dimensió fractal	1,021676803
bp_numberOfFloorsAboveGround	Número de plantes sobre rasant	5
bp_heightBelowGround	Altura de plantes sota rasant en metres. És una altura estimada de 3 metres per planta.	0
bp_numberOfFloorsBelowGround	Número de plantes sota rasant	0

Informació associada als models de radiació solar		
solrad_year_cells	Número de píxels de les cobertes	9
solrad_year_sum_kwh	Suma de la radiació total de la coberta (kWh)	89376,0278
solrad_year_mean_kwh	Mitjana de la radiació total de la coberta (kWh/m ² /any)	1760,1366
solrad_dec_cells	Número de píxels de les cobertes	9
solrad_dec_sum_kwh	Suma de la radiació de desembre de la coberta (kWh)	4384,95578
solrad_dec_mean_kwh	Mitjana de la radiació de desembre de la coberta (kWh/m ² /any)	86,3556
Béns Culturals d'Interès Nacional (BCIN)		
bic_name	Nom del Bé Cultural d'Interès Nacional	Castell de la Bisbal (la Bisbal del Penedès) RI-51-0006595
Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic		
sc_id	Identificador	19219
sc_interval	Potència de la instal·lació en interval	Pot <=5 kW
sc_beginlife	Data des de quan s'ha donat d'alta a la base de dades del cadastre	09/11/2021
sc_type	Tipus d'instal·lació	Compensació excedents
sc_location	Tipus de localització	Edifici
Municipis		
muni_id	Identificador del municipi	34094343028
muni_name	Nom del municipi	La Bisbal del Penedès
Escenaris d'aptitud de les cobertes		
scenario_1	Aptitud per l'escenari I	1
scenario_2	Aptitud per l'escenari II	1
scenario_3	Aptitud per l'escenari III	0
scenario_4	Aptitud per l'escenari IV	0
scenario_5	Aptitud per l'escenari V	0
num_of_scen_true	Número d'escenari aptes	2

Potencial de producció		
num_of_sol_panels	Número estimat de plaques FV per coberta	8
power_kw	Potència estimada d'instal·lació FV per coberta (kW)	2,8
prod_mwh_1_formula	Producció elèctrica FV estimada per coberta (MWh/any)	4,4289

3.3 Escenaris definits a partir del *cadastre solar*

La explotació de la base de dades del *cadastre solar* de Tarragona s'ha plantejat des de la definició d'escenaris amb diferents criteris d'implantació de l'energia solar fotovoltaica inclosos factors de tall relacionats amb els valors de radiació solar total.,

De l'encreuament de les dades de radiació solar juntament amb la resta de característiques, els cinc escenaris que s'han definit pretenen mostrar com la presa de decisions en certs factors afecta en alguns casos significativament, tot i que en altres l'efecte no és tant significatiu com s'esperaria de la modificació dels factors. Els escenaris enumerats de l'I al V, de menys restrictiu a més restrictiu, están fixats per diversos factors de tall (vegeu Figura 17).

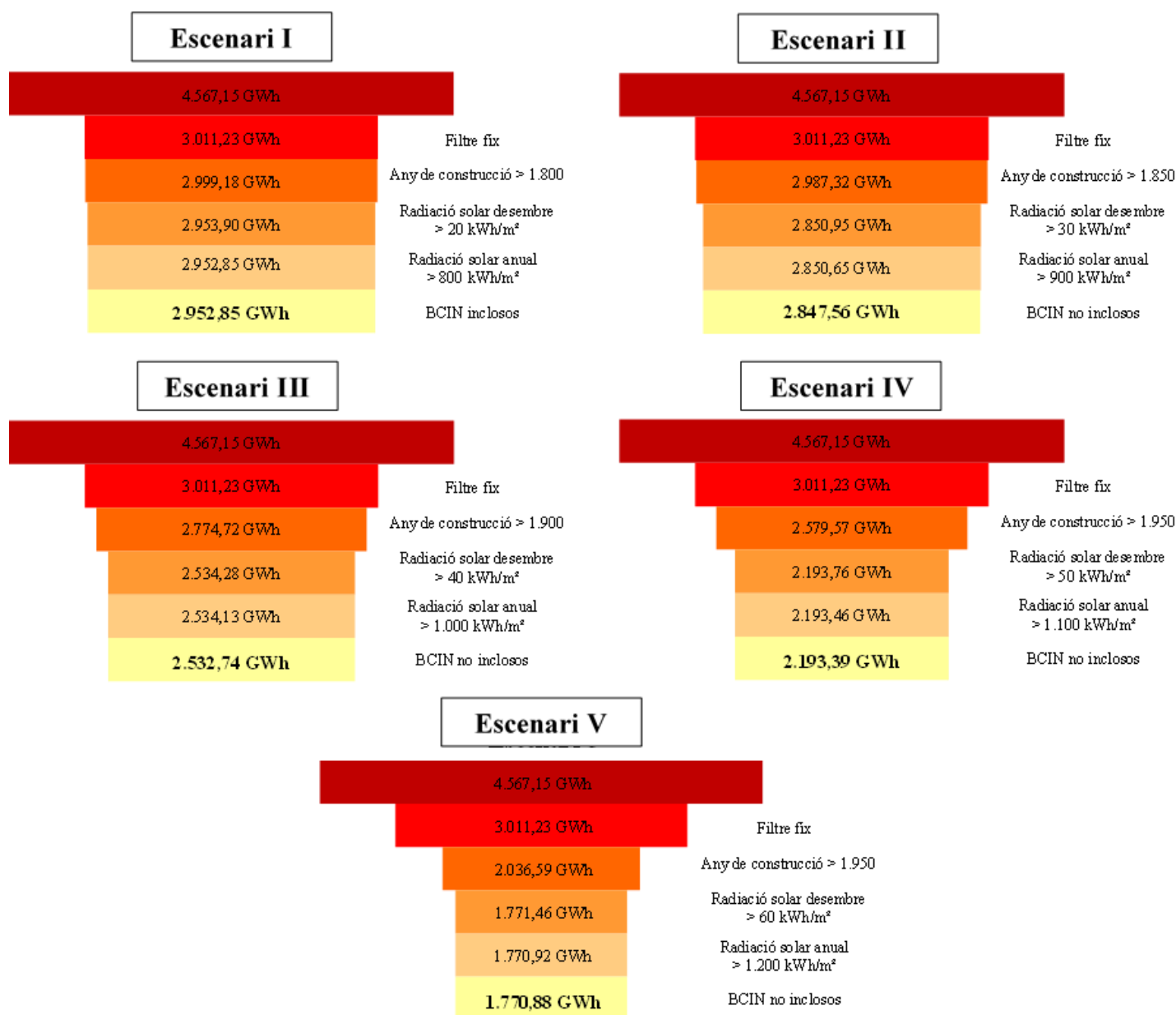


Figura 17. Gràfics d'embut dels cinc escenaris definits, de menys restrictiu (I) a més restrictiu (V). Es mostra la radiació mitjana acumulada de totes les cobertes (GWh) i com els diferents filtres aplicats afecten a l'aprofitament potencial d'energia solar a les cobertes dels edificis.

A la Figura 17 s'aprecia com actuen els diferents escenaris respecte el mateix potencial d'entrada (estimat com a models físics de radiació solar potencial). Al primer *esglaó*, es compta tota la radiació solar total incident del conjunt de cobertes sense filtrar de la demarcació de Tarragona. Al segon *esglaó*, aquest potencial disminueix a partir de l'exclusió seqüencial de les cobertes que no són aptes. Cada *gràfica d'embut* acaba amb un últim *esglaó* que compta el total de radiació solar d'aquelles cobertes que han superat el conjunt de filtres d'aptitud.

Com era d'esperar l'escenari amb els filtres menys restrictius (Escenari I) és el que menys radiació potencial descarta, mentre que l'escenari més restrictiu (Escenari V) és el que suma un menor potencial d'aprofitament. Així, a l'escenari I l'aprofitament del potencial radiatiu respecte l'inicial és del 36% de les cobertes, mentre que a l'escenari V aquest decreixement és del 81,2%, significativament més alt que els escenaris anteriors.

Entès el funcionament dels escenaris, amb el camp "num_of_scen_true" també es pot conèixer l'aptitud d'una coberta. Per explicar-nos, una coberta amb un valor 5 del camp "num_of_scen_true" no sol significa que és apte per a l'escenari V, sinò que també ho és dels anteriors (I, II, III i IV). En canvi una coberta amb un valor 1 solament és apta per a l'escenari I. Les cobertes amb un 0 assignat no són aptes en cap dels escenaris plantejats degut a que no passen cap dels filtres que es presenten als escenaris.

A mode d'exemple, la coberta de la Figura 18 no és apta per a cap dels escenaris plantejats. L'àrea de la coberta apta "[bp_core_area_1m]" és de 9,83 m², per tant inferior a 10 m² i descartable del primer filtre.



Figura 18. Coberta del municipi de Prades sense aptitud per a instal·lar plaques fotovoltaïques descartada per tenir una superfície menor a 10 m².

En referència a la coberta de la Figura 19, situada al municipi del Vendrell, és apta per a l'escenari I. La radiació mitjana de la coberta és de 1.042,95 kWh/m²/anual i 23,53 kWh/m²/desembre, l'any de construcció el 1.979 i no es tracta d'un Bé Cultural d'Interès Nacional., Per la radiació anual supera el filtre de radiació solar anual (>800 kWh/m²), la radiació solar del mes de desembre (>20 kWh/m²) així com l'any de construcció (posterior al 1.800). No obstant això, la present coberta no és apta per l'escenari II ja que la radiació solar del mes de desembre no supera els 30 kWh/m² que marca aquest escenari.



Figura 19. Exemple de coberta urbana del municipi del Vendrell amb aptitud fins l'escenari I per a instal·lar plaques fotovoltaïques.

A la Figura 20 es pot destacar una coberta industrial al municipi de Valls apta per a l'escenari II. La radiació mitjana de la coberta és de 1.330,58 kWh/m²/anual i 39,13 kWh/m²/desembre, l'any de construcció el 2.011 i tampoc es tracta d'un Bé Cultural d'Interès Nacional., Per la radiació anual supera el filtre de radiació solar anual (>900 kWh/m²), la radiació solar del mes de desembre (>30 kWh/m²) així com l'any de construcció (posterior al 1.850). Tanmateix, aquesta coberta no és apta per l'escenari III ja que la radiació solar del mes de desembre no supera els 40 kWh/m² que marca aquest escenari.

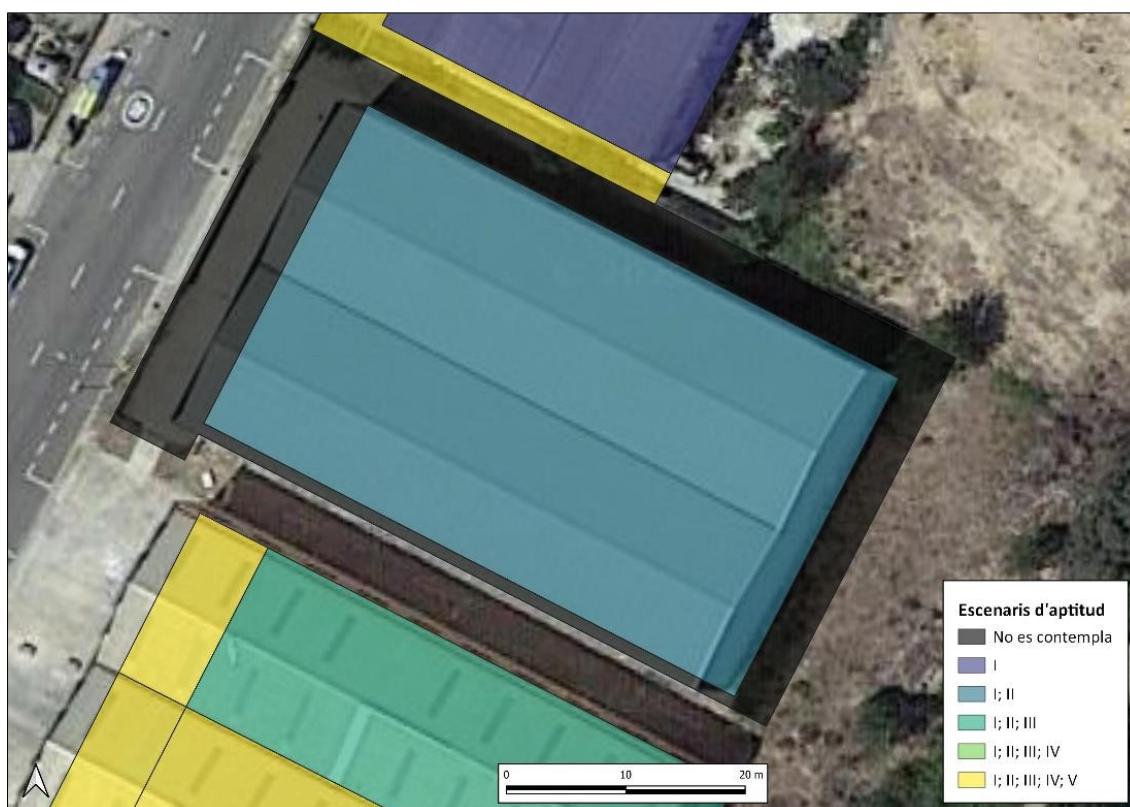


Figura 20. Exemple de coberta industrial del municipi de Valls amb aptitud fins l'escenari II per a instal·lar plaques fotovoltaïques.

La coberta d'ús residencial del municipi d'Alcanar que es pot visualitzar a la Figura 21 és apta per a l'escenari III. La radiació mitjana de la coberta és de 1.425,60 kWh/m²/anual i 47,83 kWh/m²/desembre, l'any de construcció és el 1.978 i tampoc es tracta d'un Bé Cultural d'Interès Nacional., Per la radiació mitjana anual supera el filtre de l'escenari III (>1.000 kWh/m²), la radiació solar del mes de desembre (>50 kWh/m²) així com l'any de construcció (posterior al 1.900). No obstant això, aquesta coberta no és apta per l'escenari IV a causa de que com en el darrer cas, la radiació solar del mes de desembre no supera els 50 kWh/m² que marca l'escenari quart.



Figura 21. Exemple de coberta urbana del municipi d'Alcanar amb aptitud fins l'escenari III per a instal·lar plaques fotovoltaïques.

La coberta d'ús residencial del municipi d'Alforja que s'observa a la Figura 22 és apta per a l'escenari IV. La radiació mitjana de la coberta és de 1.699,92 kWh/m²/anual i 57,97 kWh/m²/desembre; l'any de construcció és el 2.003 i no es tracta d'un Bé Cultural d'Interès Nacional., Per la radiació mitjana anual supera amb escreix el filtre de l'escenari IV (>1.100 kWh/m²), també ho fa per la radiació solar del mes de desembre (>50 kWh/m²) així com l'any de construcció (posterior al 1.950). Com en el darrer cas, la radiació solar del mes de desembre no supera els 60 kWh/m² que marca l'escenari cinquè i per tant esdevé apte per l'escenari IV, però també pels anteriors.



Figura 22. Exemple de coberta en un entorn rural del municipi d'Alforja amb aptitud fins l'escenari IV per a instal·lar plaques fotovoltaïques.

A la coberta situada al municipi de Riba-roja d'Ebre la Figura 23 es pot remarcar una coberta que assoleix l'aptitud per a l'escenari V, el més restrictiu dels cinc, i en conseqüència de tots els precedents (I; II, III; IV). La radiació mitjana de la coberta és de 1.958,61 kWh/m²/anual i 86,81 kWh/m²/desembre, l'any de construcció és també l'any 2.003 i en cap cas es tracta d'un Bé Cultural d'Interès Nacional., Per la radiació anual supera el filtre de radiació solar anual (>1.200 kWh/m²) que marca l'escenari V; per la radiació solar del mes de desembre (>60 kWh/m²) així com l'any de construcció (posterior al 1.950).

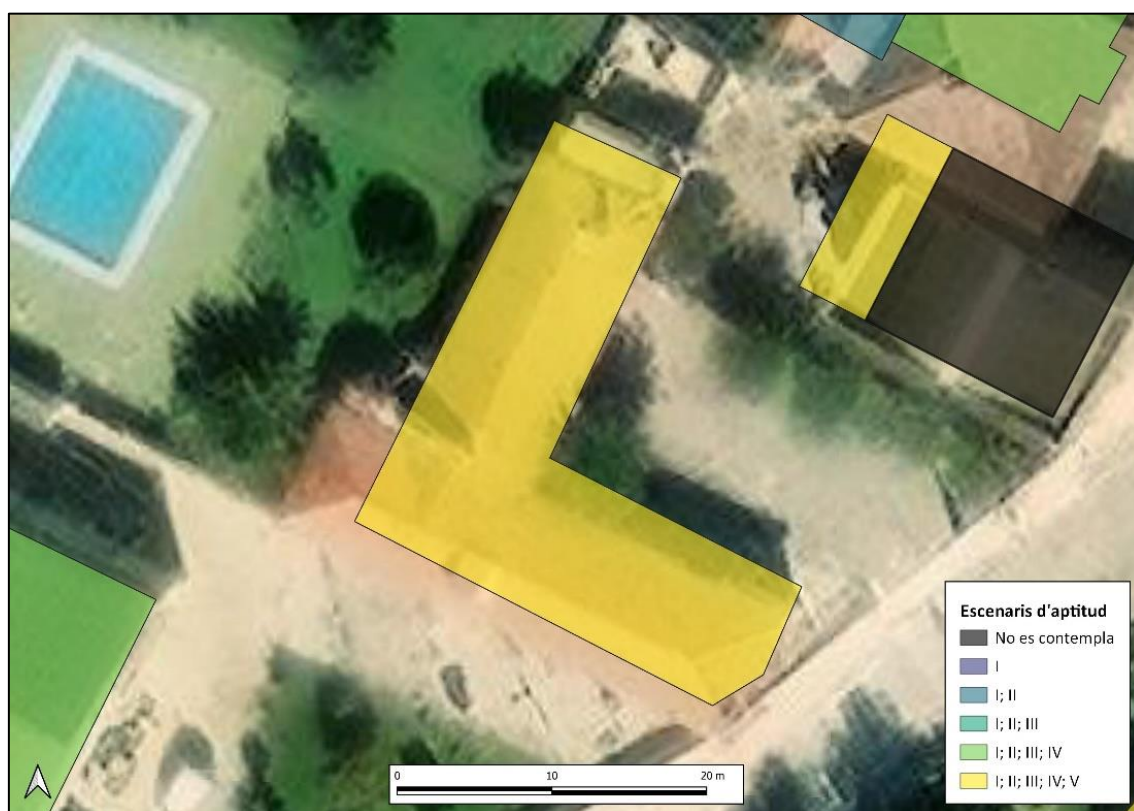
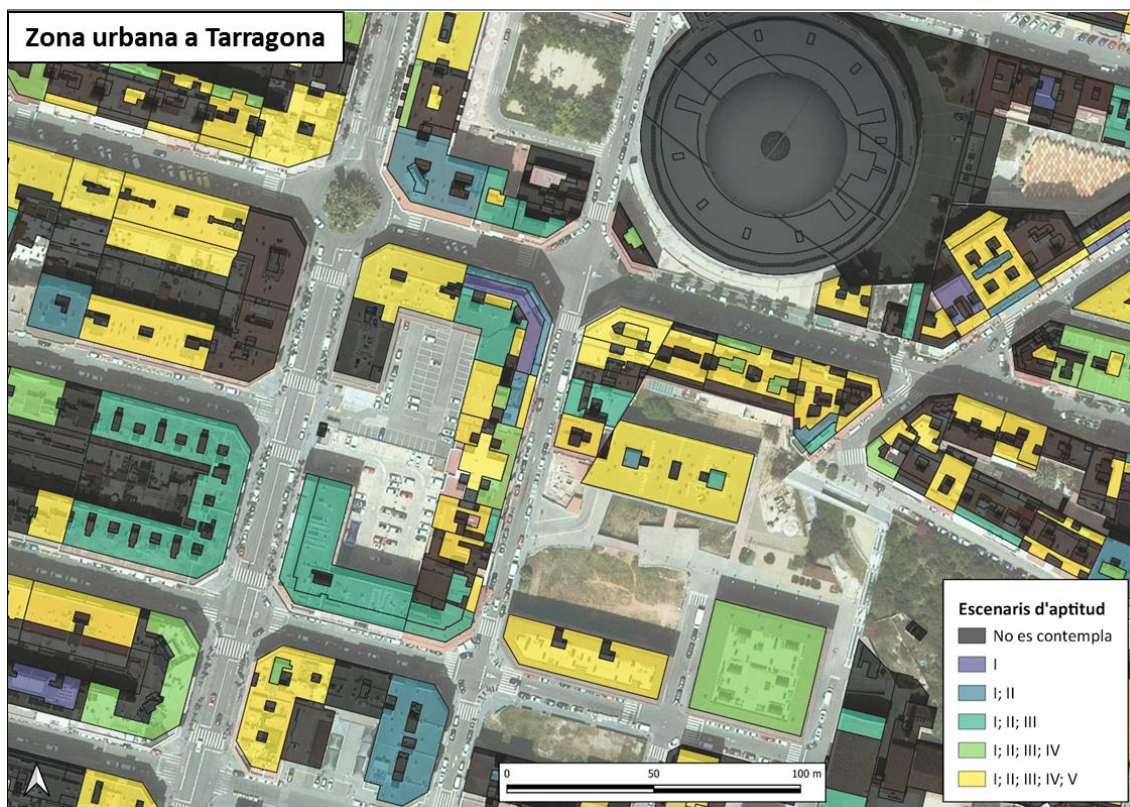


Figura 23. Exemple de coberta urbana del municipi de Riba-roja d'Ebre amb aptitud fins l'escenari V per a instal·lar plaques fotovoltaiques.

En relació a la classificació de les cobertes segons el seu últim escenari d'aptitud, a la figura 24, en una zona predominantment d'ús industrial de Reus s'aprecia la dominança de les cobertes amb una gran aptitud – superen en molts casos els cinc escenaris. En aquesta línia, s'estaria mostrant un exemple de la major productivitat de les cobertes industrials respecte les cobertes residencials.

Tanmateix, en la representació inferior es pot visualitzar com varia l'aptitud predominantment de cobertes residencials a la ciutat de Tarragona. Es pot destacar que en aquelles estructures que s'assimilen a celoberts, patis de llums o estructures molt petites queden excloses de qualsevol escenari.

S'observen certs casos on les parts d'edificis a priori semblarien aptes en qualsevol dels escenaris plantejats degut a una gran superfície de la coberta o d'entre altres raons; no obstant això, queden excloses de les escenaris degut a les condicions de l'edifici (estat ruïnós o en declivi), que es tracti de plantes baixes o inclús per sota rasant, formes de la coberta massa complexa o per valors de radiació solar anual/desembre inferior als estàndards.



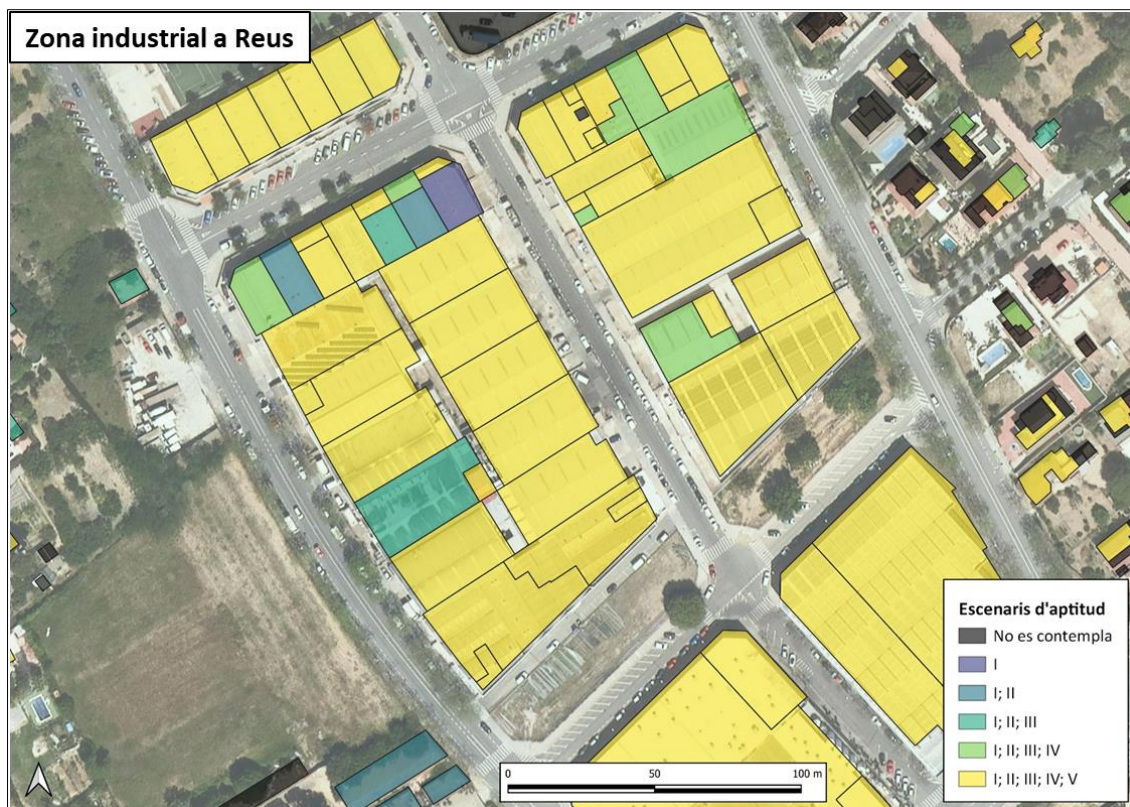


Figura 24. Cobertes segons l'últim escenari al que són aptes (I-V; de menys restrictiu a més restrictiu). El cas d'una zona d'ús predominantment residencial de Tarragona (superior) i d'una zona d'ús predominantment industrial a Reus.

Complementant anterior, a la figura 25 els resultats apunten que les cobertes industrials són més productives que les cobertes residencials. Mentre un 46% de la superfície edificada de la província de Tarragona és d'ús residencial, la producció elèctrica estimada d'aquestes seria del 31%. En referència als edificis d'ús industrial, la seva ocupació a l'espai edificat és del 23% però la producció elèctrica fotovoltaica estimada seria del 31%.

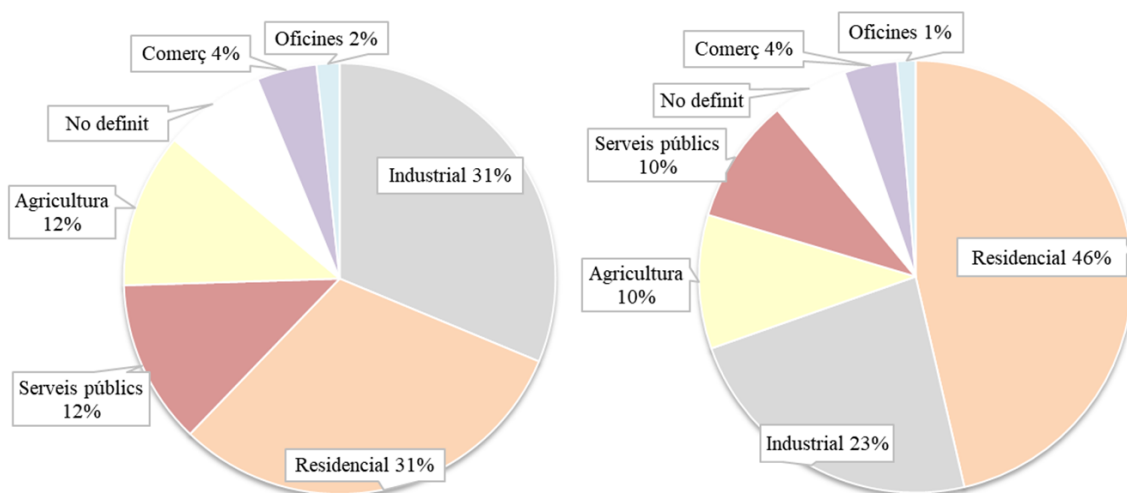


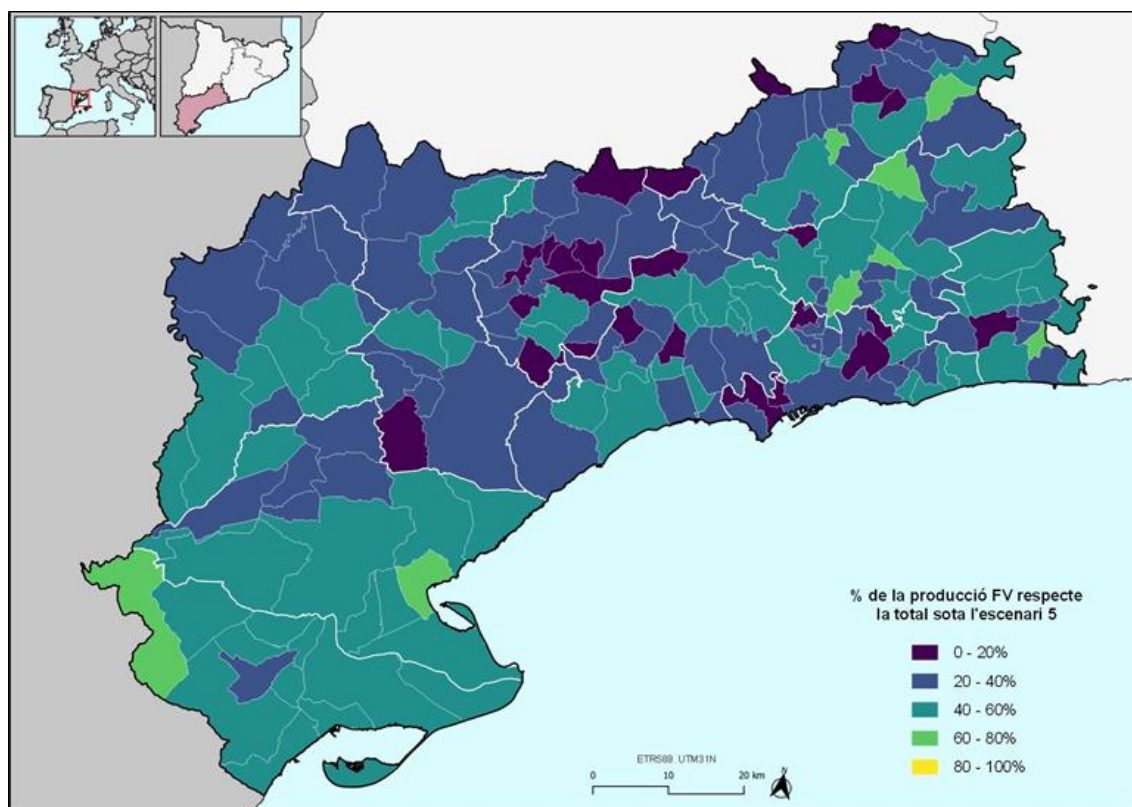
Figura 25. Distribució (%) de la producció elèctrica FV segons l'ús dels edificis (esquerra) i distribució (%) de la superfície de cobertes segons l'ús dels edificis (esquerra). Elaboració pròpia.

Per continuar, es realitzarà una anàlisi més detallada dels resultats (número de panells FV, potència instal·lada en MW i producció elèctrica fotovoltaica en GWh) en relació a l'ús de l'edifici i l'escenari d'aptitud. Els resultats s'expressen en una taula amb el número de panells fotovoltaics, potència instal·lada i producció elèctrica segons l'ús, complementat amb un mapa municipal identificant les cobertes de cada municipi en un interval de la producció fotovoltaica respecte la total potencial sota l'escenari triat.

Dels escenaris plantejats, el **cinquè escenari**, el més restrictiu dels cinc aculliria la xifra de 3.026.219 panells fotovoltaics, el que equival a 1.059 MW de potència instal·lada i a una producció de 1.771 GWh. En referència al consum mig anual de la demarcació de Tarragona - 6.437,73 GWh-, es podrien arribar a suplir amb energia fotovoltaica el 27,3% del consum elèctric anual. Els edificis industrials destaquen amb diferència per sobre la resta amb una producció elèctrica estimada de 728,4 GWh respecte els 539,5 GWh de l'àmbit residencial (Taula 16). Així mateix, el mapa (Figura 26) il·lustra la producció elèctrica FV que adoptarien les cobertes que són aptes per l'escenari V respecte la producció total si s'utilitzessin totes les cobertes aptes i no aptes. En general els municipis se situen entre l'interval 20-40% o 40-60% amb algunes excepcions a l'interval 60-80% així com més casos, sobretot al Priorat, a l'interval 0-20%. Torna a destacar per la part alta el municipi de les Piles amb un 68,6% i per la part baixa un 4,5% a Vilanova de Prades.

Taula 16. Número de panells solars fotovoltaics, potència (MW) i producció elèctrica estimada (GWh) segons l'ús de l'edifici de les cobertes de la província de Tarragona que compleixen l'escenari d'aptitud V.

Escenari V			
Ús de l'edifici	Núm. de panells FV	Potència (MW)	Producció elèctrica (GWh)
Residencial	917.945	321,28	539,50
Agricultura	440.129	154,04	260,39
Industrial	1.248.331	436,91	728,42
Oficines	55.159	19,30	32,05
Comercial	133.261	46,64	77,22
Serveis públics	211.705	74,09	121,65
ND	19.689	6,89	11,64
Total	3.026.219	1.059	1.771

**Figura 26.** Percentatge de la producció elèctrica fotovoltaica amb cobertes aptes a l'escenari V respecte la producció elèctrica amb totes les cobertes aptes als cinc escenaris de la província de Tarragona.

El **quart escenari**, de caràcter menys restrictiu que el cinquè, acull la xifra de 3.831.194 panells fotovoltaics, el que equival a 1.341 MW de potència instal·lada i una producció de 2.193 GWh. Fent referència als 6.437,73 GWh de consum mig anual (2013-2020) a la demarcació de Tarragona, es podria suplir amb energia fotovoltaica el 34,1% del consum elèctric anual. Els industrials dominen tots els àmbits amb una producció de 868,3 GWh seguit dels residencials amb 667,6 GWh (Taula 17).

En referència al mapa (Figura 27) il·lustra la producció elèctrica FV que adoptarien les cobertes que són aptes per l'escenari IV respecte la producció total si s'utilitzessin totes les cobertes aptes i no aptes. En general els municipis se situen entre l'interval 40-60% i 20-40%. Municipis com les Piles o la Sènia destaquen per la part alta amb un 76% i pel costat contrari Vilanova de Prades amb un 6,5%.

Taula 17. Número de panells solars fotovoltaics, potència (MW) i producció elèctrica estimada (GWh) segons l'ús de l'edifici de les cobertes de la província de Tarragona que compleixen l'escenari d'aptitud IV.

Escenari IV			
Ús de l'edifici	Núm. de panells FV	Potència (MW)	Producció elèctrica (GWh)
Residencial	1.164.155	407,45	667,58
Agricultura	543.317	190,16	316,26
Industrial	1.513.635	529,77	868,31
Oficines	66.590	23,3	37,93
Comercial	165.824	58,03	94,29
Serveis públics	353.583	123,75	195,11
ND	24.090	8,43	13,96
Total	3.831.194	1.341	2.193

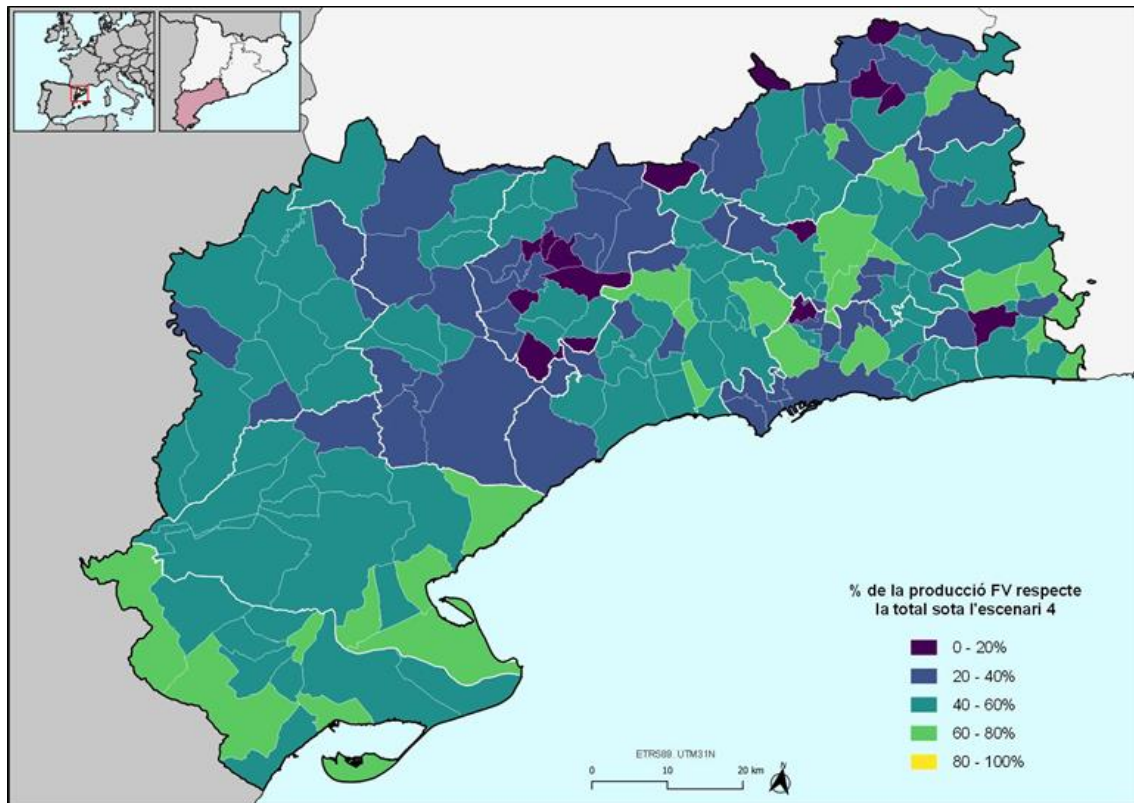


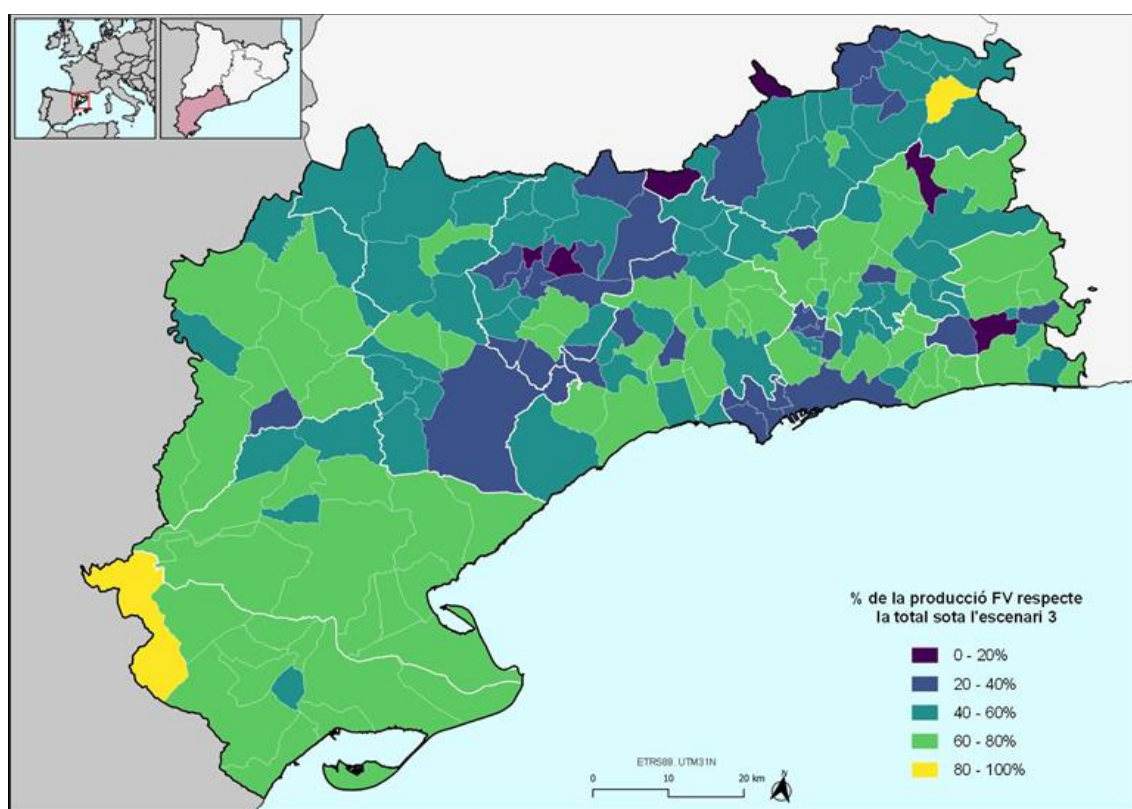
Figura 27. Percentatge de la producció elèctrica fotovoltaica amb cobertes aptes a l'escenari IV respecte la producció elèctrica amb totes les cobertes aptes als cinc escenaris de la província de Tarragona.

El **tercer escenari**, a la part intermitja entre els menys restrictius i els més restrictiu es recull la xifra de 4.483.734 panells FV, equivalent 1.569 MW de potència instal·lada i una producció de 2.534 GWh. El 39,3% del consum elèctric anual de Tarragona es podria suplir respecte els 6.437 GWh de consum anual. Els edificis industrials amplien l'avantatge respecte els residencials amb una producció de 957,8 GWh respecte 823,2 GWh respectivament sota l'escenari III (Taula 18).

Pel que respecta al mapa (Figura 28) il·lustra la producció elèctrica FV que adoptarien les cobertes que són aptes per l'escenari III respecte la producció total si s'utilitzessin totes les cobertes aptes i no aptes. En general els municipis se situen entre l'interval 60-80%, amb força municipis de l'interior de la província al rang 40-60%. Destacarien municipis com la Sénia amb un 81,7% com a més apte per aquest escenari i de la banda contrària el Pont d'Armentera amb un 5,1%.

Taula 18. Número de panells solars fotovoltaics, potència (MW) i producció elèctrica estimada (GWh) segons l'ús de l'edifici de les cobertes de la província de Tarragona que compleixen l'escenari d'aptitud III.

Escenari III			
Ús de l'edifici	Núm. de panells FV	Potència (MW)	Producció elèctrica (GWh)
Residencial	1.463.341	512,16	823,21
Agricultura	642.458	224,86	370,13
Industrial	1.685.964	590,08	957,84
Oficines	72.325	25,31	40,77
Comercial	190.477	66,66	106,7
Serveis públics	397.720	139,2	217,54
ND	31.449	11	17,91
Total	4.483.734	1.569	2.534

**Figura 28.** Percentatge de la producció elèctrica fotovoltaica amb cobertes aptes a l'escenari III respecte la producció elèctrica amb totes les cobertes aptes als cinc escenaris de la província de Tarragona.

El **segon escenari**, agrupa 5.109.773 panells FV, el que equival a 1.788 MW de potència instal·lada i una producció de 2.851 GWh. En referència al consum elèctric anual de la demarcació, sota l'escenari II es podria suplir amb energia fotovoltaica el 44,2% del consum. Els edificis industrials superen als residencials com a principals productors (Taula 19).

El mapa (Figura 29) il·lustra la producció elèctrica fotovoltaica que adoptarien les cobertes que són aptes per l'escenari II respecte la producció total si s'utilitzessin totes les cobertes aptes i no aptes. En general els municipis se situen entre l'interval 60-80% així com a l'interval 40-60% o en alguns casos 80-100% i inferiors. En poden destacar municipis com les Piles amb un 91,4% per la part alta, i Albinyana amb un 17,1% per la part baixa.

Taula 19. Número de panells solars fotovoltaics, potència (MW) i producció elèctrica estimada (GWh) segons l'ús de l'edifici de les cobertes de la província de Tarragona que compleixen l'escenari d'aptitud II.

Escenari II			
Ús de l'edifici	Núm. de panells FV	Potència (MW)	Producció elèctrica (GWh)
Residencial	1.818.634	636,52	1.005,63
Agricultura	686.843	240,39	392,56
Industrial	1.843.562	645,24	1.035,51
Oficines	75.046	26,26	42,06
Comercial	209.897	73,46	116,06
Serveis públics	439.501	153,82	238,64
ND	36.290	12,70	20,15
Total	5.109.773	1.788	2.85

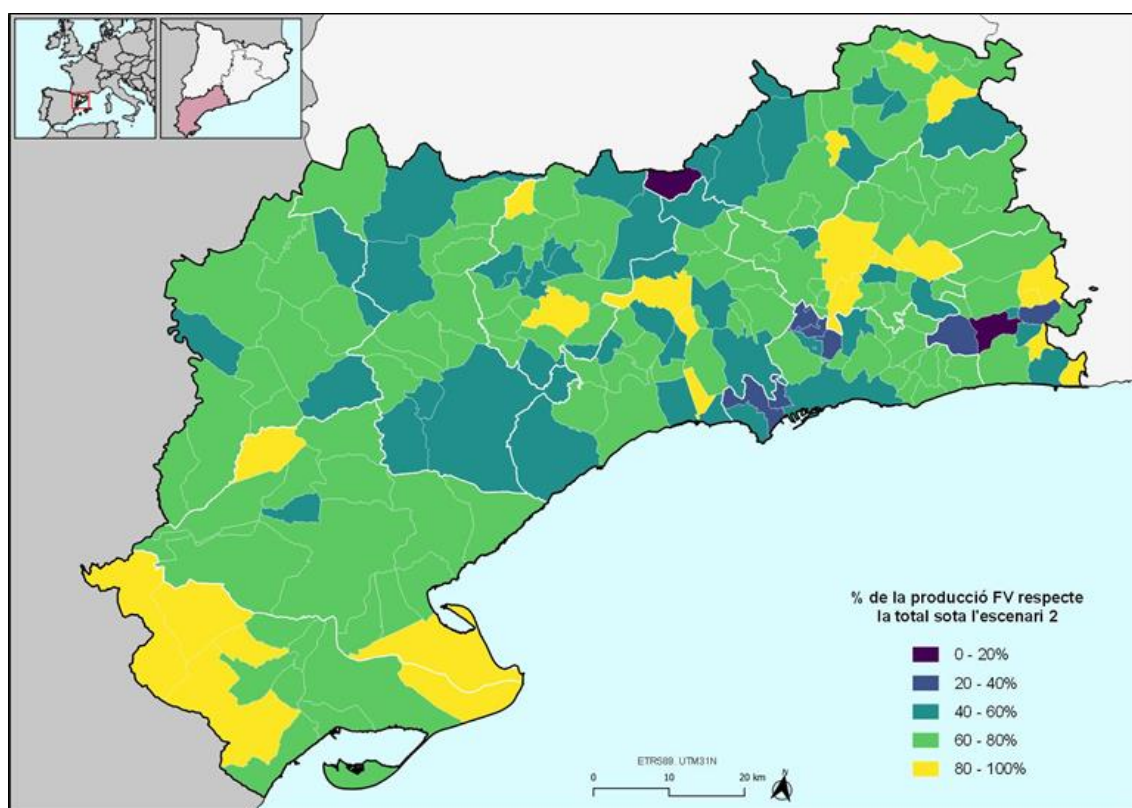


Figura 29. Percentatge de la producció elèctrica fotovoltaica amb cobertes aptes a l'escenari II respecte la producció elèctrica amb totes les cobertes aptes als cinc escenaris de la província de Tarragona.

El **primer escenari**, el menys restrictiu dels cinc acull la xifra de 5.367.388 panells FV, el que equivaldria a 1.879 MW de potència instal·lada i una producció de 2.953 GWh. Fent referència als 6.437,73 GWh de consum mig anual (2013-2020) a la demarcació de Tarragona, es podria suplir amb energia fotovoltaica el 45,9% del consum elèctric anual. Els edificis residencials i industrials dominen com a principals productors (Taula 20).

Fent referència al mapa (Figura 30) il·lustra la producció elèctrica FV que adoptarien les cobertes que són aptes per l'escenari 1 respecte la producció total si s'utilitzessin totes les cobertes aptes i no aptes. En general els municipis se situen entre l'interval 60-80% o 80-100%. En aquest sentit es podrien destacar municipis com Vila-rodona amb un 87,3% per la part alta, i Vilanova de Prades per la part baixa amb un 20,2%.

Taula 20. Número de panells solars fotovoltaics, potència (MW) i producció elèctrica estimada (GWh) segons l'ús de l'edifici de les cobertes de la província de Tarragona que compleixen l'escenari d'aptitud I.

Escenari I			
Ús de l'edifici	Núm. de panells FV	Potència (MW)	Producció elèctrica (GWh)
Residencial	1.965.684	687,98	1.063,67
Agricultura	703.296	246,15	399,36
Industrial	1.902.866	666	1.058,74
Oficines	79.543	27,84	43,74
Comercial	218.286	76,4	119,32
Serveis públics	460.788	161,27	247,57
ND	36.925	12,92	20,41
Total	5.367.388	1.879	2.953

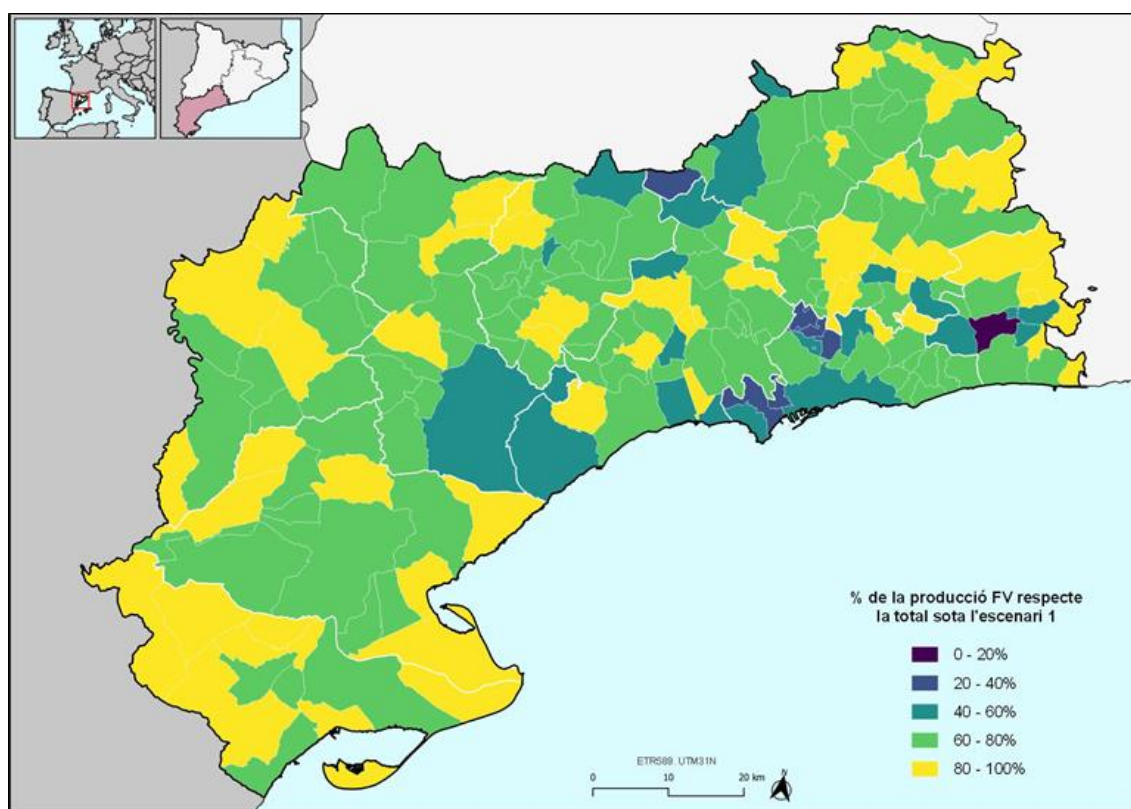


Figura 30. Percentatge de la producció elèctrica fotovoltaica amb cobertes aptes a l'escenari I respecte la producció elèctrica amb totes les cobertes aptes als cinc escenaris de la província de Tarragona.

3.4 Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic

A Catalunya i també a la província de Tarragona hi hagut un increment de les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic constata de l'anàlisi dels resultats que ofereix la base de dades de l'ICAEN (2023b). En línia amb aquesta evolució favorable de les instal·lacions fotovoltaiques a **Catalunya**, el Principat ha passat de tenir 1,24 MW d'instal·lacions fotovoltaiques destinades a l'autoconsum l'any 2013 a **466,59 MW de potència instal·lada l'any 2022**. A la província de **Tarragona**, la dinàmica ha estat similar, passant dels 0,15 MW instal·lats l'any 2013 als **58,87 MW** l'any 2022. De cara al futur, si segueix la tendència actual es preveu una alça significativa de noves instal·lacions fotovoltaiques. Pel que s'observa a la figura 31, les instal·lacions fotovoltaiques es situen en aquelles zones més poblades de Catalunya, destacant al cinturó metropolità de Barcelona, Camp de Tarragona, Girona, litoral català i terres de Lleida.

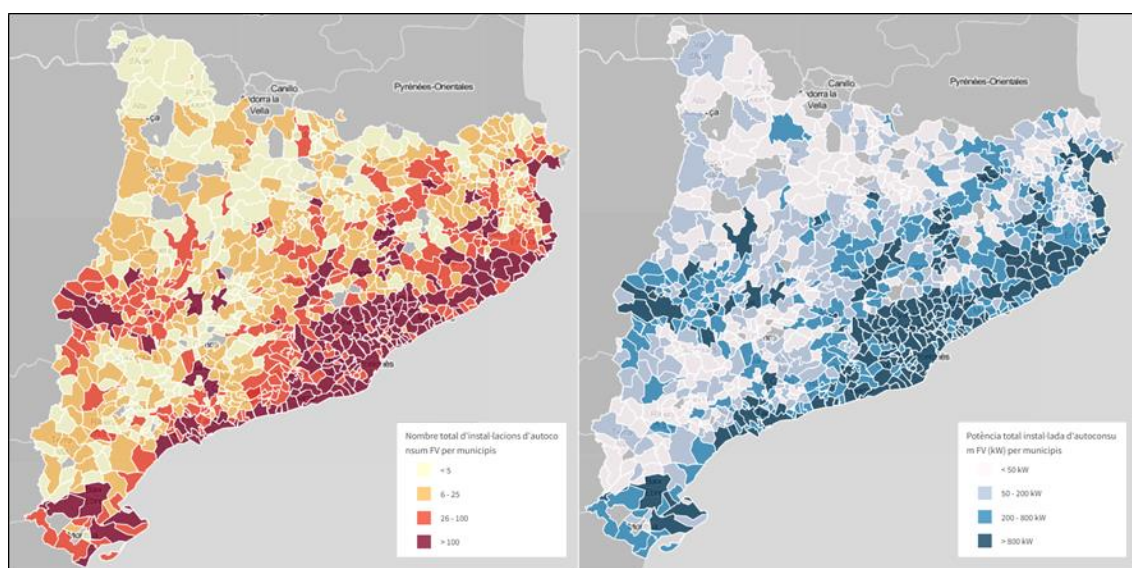


Figura 31. Nombre total d'instal·lacions d'autoconsum FV per municipis (esquerra), potència total instal·lada d'autoconsum FV en kW per municipis (dreta). Font: ICAEN (2023b) .

Per analitzar l'increment d'adopció fotovoltaica es remarcable que el desembre de l'any 2019 el nombre d'instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic a la província de Tarragona era de 148 mentre que dos anys i tres mesos després el nombre d'instal·lacions passa a 3.332, presentant un augment del 2.251% (vegeu les Figures 32 i 33).

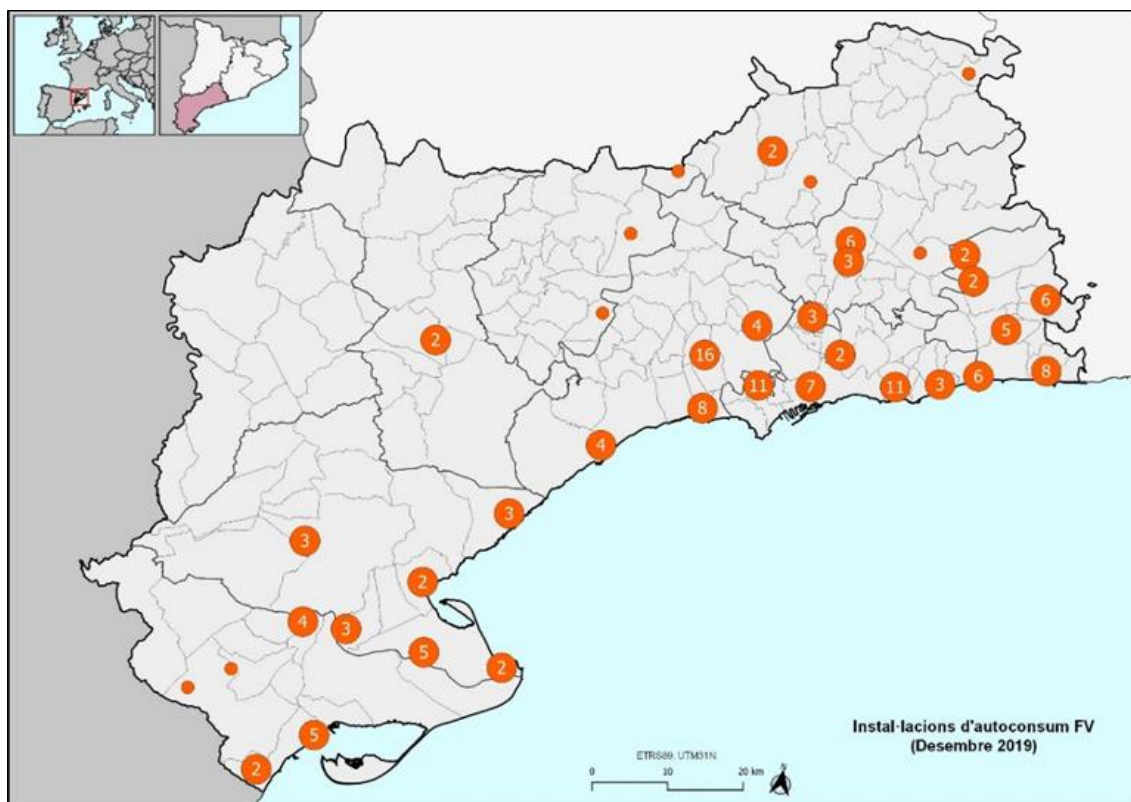


Figura 32. Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaiques fins el desembre del 2019. Font: ICAEN (2023b).

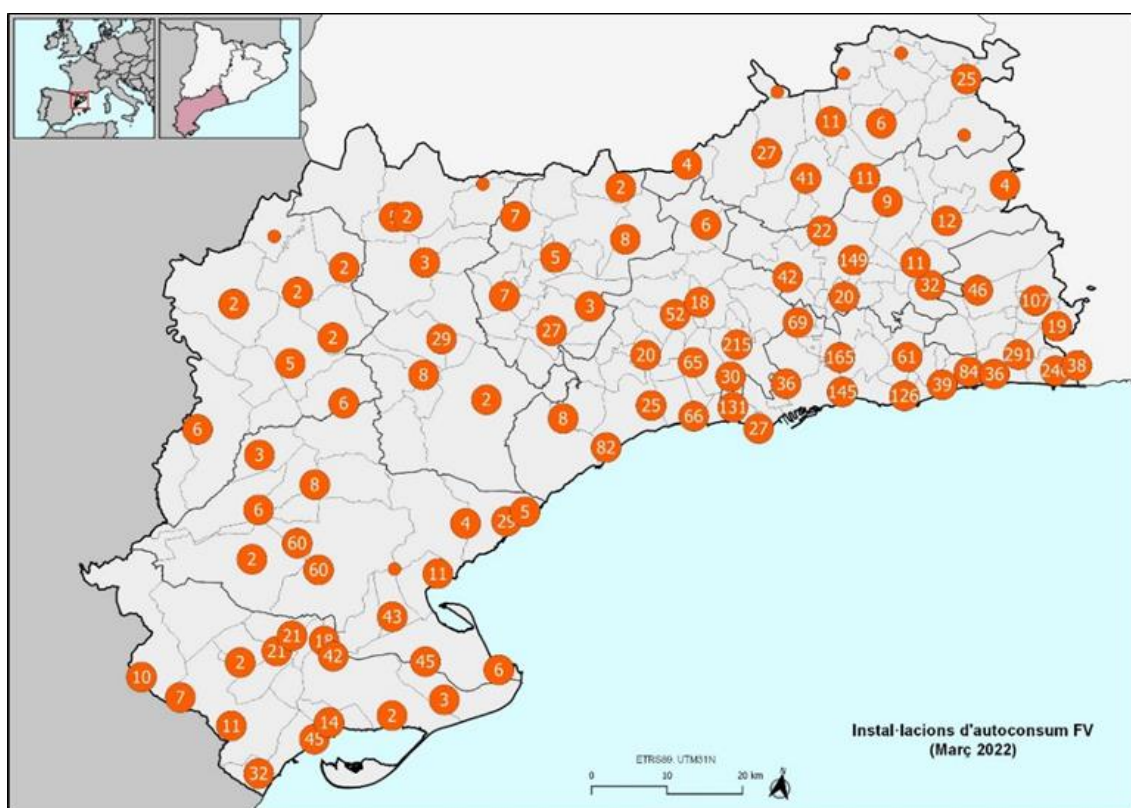


Figura 33. Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaiques fins el març del 2022. Font: ICAEN (2023b).

La figura 33, permet visualitzar una major dispersió del desplegament d'instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic mentre que a la figura 32, s'observen aïllades instal·lacions d'autoconsum.

En referència a les instal·lacions que intersequen amb Parts d'Edificis (*BuildingParts*) s'han identificat 1.715 instal·lacions (51,48%) que intersequen amb una coberta que compleix algun dels cinc escenaris d'aptitud. De la resta de casos, 1.617 instal·lacions (48,52%), s'observa que les cobertes no superen algun dels filtres d'aptitud dels escenaris o en altres situacions no s'ha pogut relocalitzar el punt corresponent a la instal·lació sobre una coberta determinada. Si ens referim als 1.715 punts intersecats per l'últim escenari al qual les cobertes són aptes, és remarcable l'elevat percentatge de cobertes que pertanyen a l'escenari V, el més restrictiu (vegeu Figura 34). Cal especificar que les instal·lacions que són aptes a l'escenari V, també ho són pels escenaris precedents, i així successivament amb els escenaris menors.

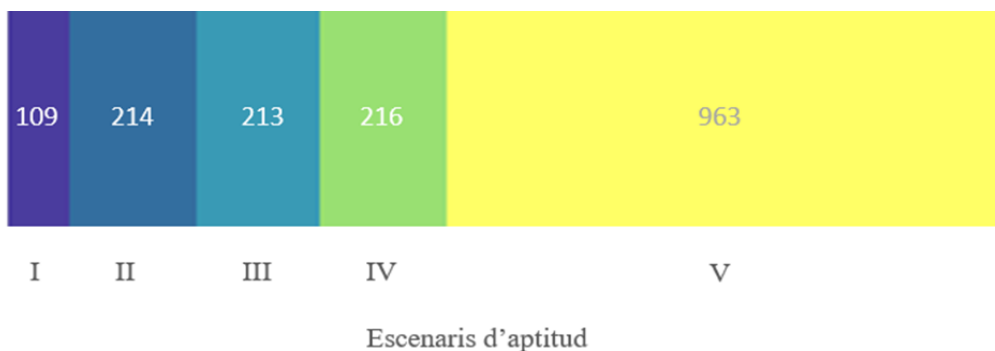
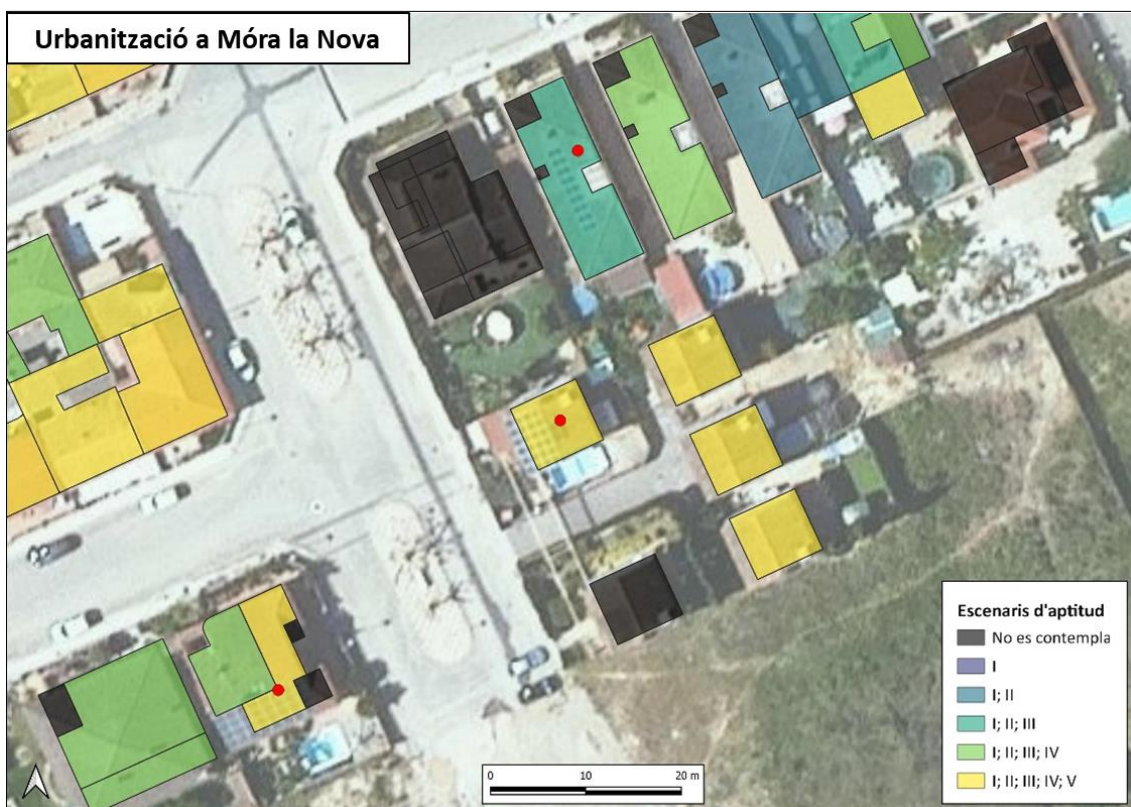
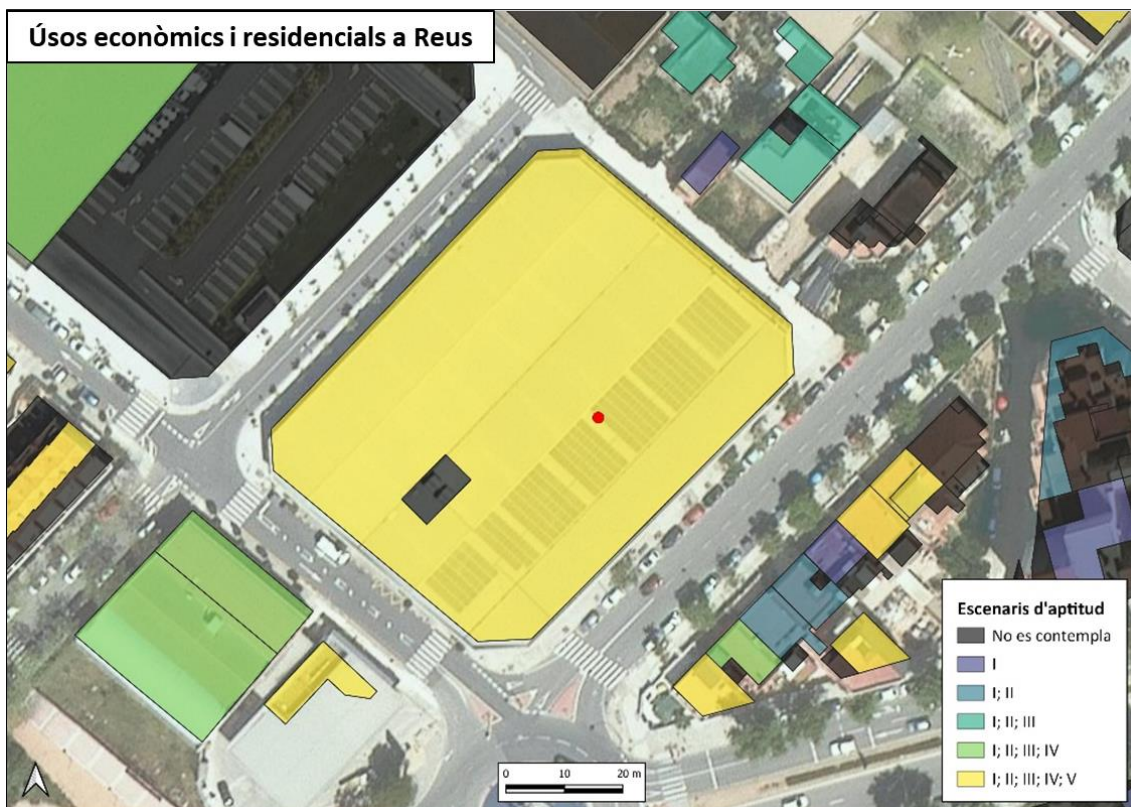


Figura 34. Número d'instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic segons l'últim escenari d'aptitud (I-V; de menys restrictiu a més restrictiu).

En aquest sentit, significaria que la creació d'escenaris apunta a que l'últim escenari (V), tot i ésser el més restrictiu, acostuma a seleccionar aquelles cobertes més òptimes per a la instal·lació d'energia fotovoltaica. És a dir, la majoria de les instal·lacions fotovoltaiques s'han instal·lat en cobertes que superen els filtres d'aptitud més estrictes. A la figura 35 s'observen tres exemples d'aquesta situació.



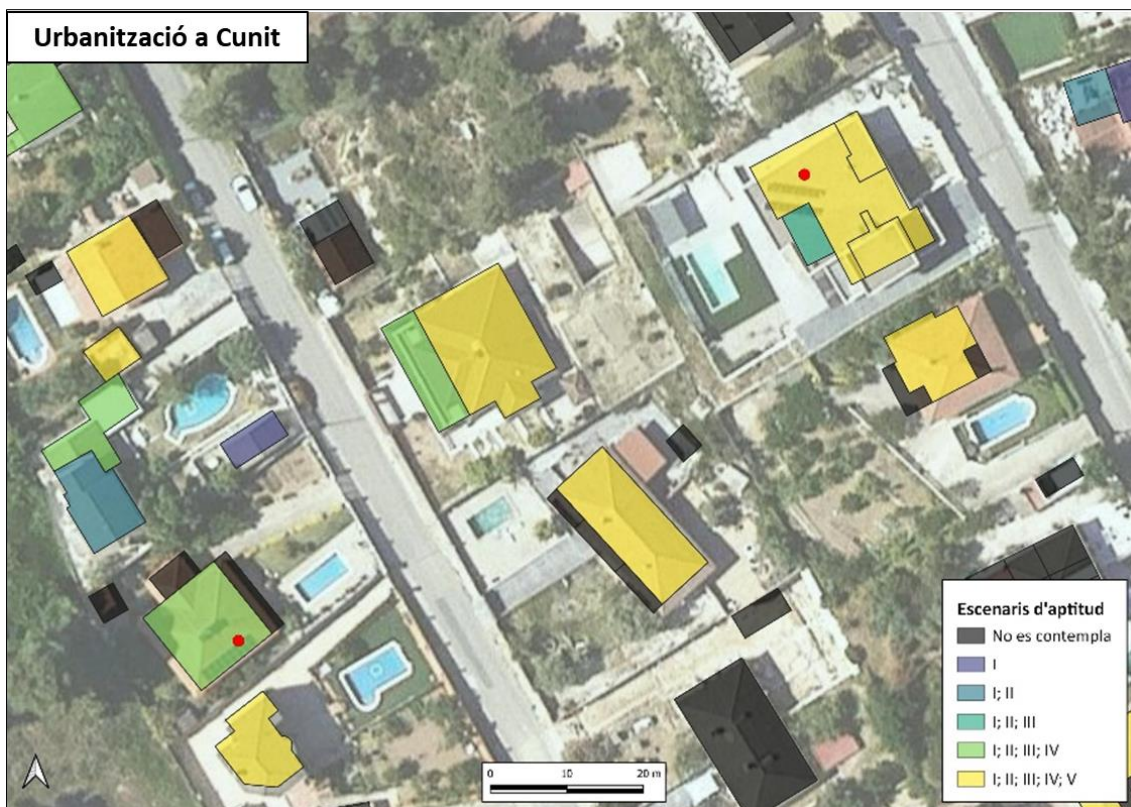


Figura 35. Instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic (punt vermell) sobre les cobertes segons l'últim escenari al que són aptes (I-V; de menys restrictiu a més restrictiu). El cas de Reus, Móra la Nova i Cunit.

4. Discussió

4.1 Elaboració d'un *cadastre solar*

En aquest estudi s'ha proposat i aplicat un **mètode per elaborar un cadastre solar de la província de Tarragona**, capaç d'oferir informació de qualitat, útil i accessible per la planificació de la transició energètica o l'estudi de l'adopció de tecnologies fotovoltaïques, entre altres possibles aplicacions. A més a més, l'esperit d'aquest estudi ha estat generar informació útil per a impulsar l'adopció d'energies fotovoltaïques, prioritàriament, sobre sòls alterats com marca l'article 19 de la LLEI 16/2017, de l'1 d'agost, del canvi climàtic. D'aquesta manera, generar aquest coneixement podria permetre ajustar espacialment els espais potencials per adoptar instal·lacions fotovoltaïques que en certs entorns poden amenaçar els valors paisatgístics i naturals del territori.

Els treballs efectuats en aquest estudi mostren algunes de les possibles aplicacions que se li pot donar a un *cadastre solar* elaborat a partir de **diverses fonts d'informació**. En aquest sentit, cal dir que aquesta proposta no hagués sigut possible de no disposar de forma oberta de diverses capes d'informació cartogràfica com són la base de dades de cadastre (DG del Catastro, 2023), dades LiDAR o un model digital de superfícies d'una resolució adequada (CNIG, 2023) o una base de dades de localització de les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic de Catalunya.

Una contribució a destacar d'aquest treball, és que s'ha proposat un flux de treball detallat (Figura 4) i, per tant, més **reproducible per a crear la base de dades del cadastre solar** a partir de dades obertes. La elaboració d'una bona documentació, codi obert i altres pràctiques reconegudes, són necessàries per a aconseguir un alt grau de reproductibilitat de la recerca (Zaragozí *et al.*, 2020). Cal destacar que les dades cadastrals estan estandarditzades a nivell europeu per les especificacions INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) permetent que aquesta font pugui estar disponible per diferents països i sigui extrapolable i reproducible més fàcilment a altres territoris europeus.

El **procés d'obtenció del cadastre solar de la província de Tarragona** ha sigut **automatitzat parcialment** en forma de scripts i expressions. Les definicions dels cinc escenaris d'aptitud de les cobertes proposats (Figures 38, 39, 40, 41 i 42 de l'annex) s'han codificat com a expressions de la calculadora de camps de QGIS. Altres tasques com el càlcul dels models de radiació solar (Figura 43) o les estadístiques zonals també han estat automatitzades. Tanmateix, seria interessant posar a prova altres algorismes disponibles de manera oberta i comparar la despesa temporal així com la qualitat de la informació produïda entre diferents eines. Per a generar un procés parcialment automatitzat temporalment no excessiu, el qual va resultar en 2.390 minuts (40 hores), es va emprar una estació de treball d'altres prestacions. En comparació amb l'ús de l'ordinador personal amb característiques computacionals inferiors, la despesa temporal hagués estat considerablement superior. De la mateixa manera, caldria reflexionar com es degradarien temporalment els processos de modelització de radiació solar si la resolució s'ampliés a 2m o 1m.

En línia amb el que comentàvem, la resolució a la que el *cadastre solar* opera és una qüestió clau i és que, si aquesta es redueix, les dades obtingudes podrien no ser útils en determinades aplicacions. En aquest sentit, es pot pensar que els models i escenaris creats seran representatius de les dades reals i que només en determinats circumstàncies caldrà fer una revisió individualitzada (per exemple, en casos de parts d'edificis molt estretes, edificis molt alts on el MDS o la ortofoto no tinguin una projecció cartogràfica adequada, entre altres casos ja comentats). En comparació a models creats en estudis precedents, s'han revisat treballs en els que s'han generat capes SIG amb informació de la irradiació útil per coberta a nivell de teulada així com la irradiació mitja la instal·lació potencial a les distintes parts dels edificis (Travesset-Baró *et al.*, 2021). Aquest nivell de detall també ha estat creat en aquest estudi però, a més a més, en la proposta presentada en aquest treball s'han afegit altres atributs d'interès com els usos de l'edifici, el nombre d'habitatges o un nivell d'aptitud per a diferents escenaris que poden ser de gran utilitat per a identificar les millors parts dels edificis, municipis o comarques a prioritzar per a la instal·lacions de panells solars.

El mètode de treball del present estudi ha tingut punts en comú amb la metodologia de Gooding *et al.*, (2015) el qual emprà eines SIG a partir de Models Digitals de Superfície (MDS) o Travesset-Baro *et al.*, (2021) que van més enllà i parlen de la importància en incorporar MDS a partir de dades LiDAR que permetin representar de forma precisa les zones urbanes i la orografia influent a la generació d'ombres. De fet, en aquest treball s'ha treballat amb un MDS i en conseqüència un model de radiació solar més extens que l'actual delimitació de la província de Tarragona per a incorporar les ombres orogràfiques. Una altra característica distintiva de la base de dades proposada, ha sigut el càlcul de models de radiació solar potencial a una resolució temporal mensual, que també poden ser considerades per a diferents finalitats. En addició, els resultats d'aquest treball donen informació en detall de 184 municipis. Els resultats van més enllà que estudis de potencial solar de teulades a nivell local com el de Quirós *et al.*, (2018) aplicat a la ciutat Càceres, o a la ciutat de Vitòria-Gasteiz de Caamaño i Díaz-Palacios (2019).

4.2 Aplicacions d'un cadastre solar

En aquest treball s'han definit només **cinc escenaris d'aptitud que tenen en compte o descarten les cobertes dels edificis**. Els diferents escenaris s'enfoquen en característiques que habitualment compliran les teulades dels edificis industrials (més grans i més compactes) mentre que en els edificis residencials hi ha una major diversitat estructural i funcional i per tant resulten més difícils d'assolir escenaris d'aptitud majors. L'actual tendència a l'alça de les tecnologies fotovoltaïques a Catalunya on s'ha incrementat la potència instal·lada anual més de 23 vegades la potència anual que s'instal·lava tan sols fa 9 anys enrere, està generant un context ideal per a que des de la recerca s'actualitzin i es creïn bases de dades completes i precises sobre la implantació de les tecnologies solars fotovoltaïques. És destacable la el 56,1% de les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic enregistrades en la base de dades de l'ICAEN que hem pogut associar amb edificis concrets ho fan sobre cobertes que són aptes a l'escenari més restrictiu de tots (V) (Figura 34). En aquest sentit, cal remarcar la necessitat de modelar l'adopció fotovoltaica a partir de dades de qualitat i crear escenaris d'aptitud per a seleccionar les cobertes que millor puguin acollir les instal·lacions fotovoltaïques i a la vegada generin més rendibilitat productiva als propietaris.

En aquest treball s'ha comprovat que segons els resultats associats a la proposta metodològica un 45,9% de l'energia elèctrica consumida a la província de Tarragona (6.427,73 GWh) en relació al consum mig anual (2013-2020) podria ser coberta per tecnologies fotovoltaïques sobre cobertes aptes sota l'escenari menys restrictiu (*Escenari D*). A l'escenari més restrictiu (*Escenari V*) el percentatge d'energia elèctrica produïda es situa al 27,3% del consum elèctric anual de la província de Tarragona. En línia amb aquests resultats, els actors del territori que s'ocupen de la planificació o gestió de la transició energètica podrien prendre les **dades del cadastre solar com una referència estimada útil per a desenvolupar polítiques de planificació territorial** en matèria d'energies, sempre tenint en compte el marc en el que es calculen. En aquest sentit, aquesta base de dades pot servir pot ser emprat per a (1) generar escenaris alternatius, (2) proposar noves variables a incorporar (tipus de propietats, normatives amb les que es van construir els edificis, materials de les cobertes, restriccions locals o paisatgístiques, etc.), i (3) per prioritzar ubicacions per a noves instal·lacions en base a criteris particulars.

S'ha generat una **eina útil** que permetria **facilitar als actors territorials i als ciutadans l'adopció d'energies renovables solars sobre cobertes** en forma d'instal·lacions individuals, comunitats energètiques o d'altres modes d'aprofitament. De fet, la base de dades creada vol servir com una eina de qualitat i detallada per poder ser aplicada per les institucions públiques locals i altres. En relació a aquest tipus d'eines, a la província de Tarragona ja hi ha experiències prèvies sobre la transmissió de dades similars a tècnics en transició energètica en relació a l'estimació fotovoltaïca de les cobertes a la província de Tarragona. En aquests estudis i en les sessions de difusió de resultats, va quedar clar l'interès que poden tenir aquestes dades pels agents públics i privats, tant és així que ja existeixen diverses eines, normalment en forma de visors *web* interactius, que permetin als usuaris consultar dades relacionades amb la radiació solar que reben les cobertes, estimacions de producció fotovoltaïca o altres paràmetres que també estimen el nombre de plaques i la potència d'una possible instal·lació sobre aquella teulada (Figura 36).

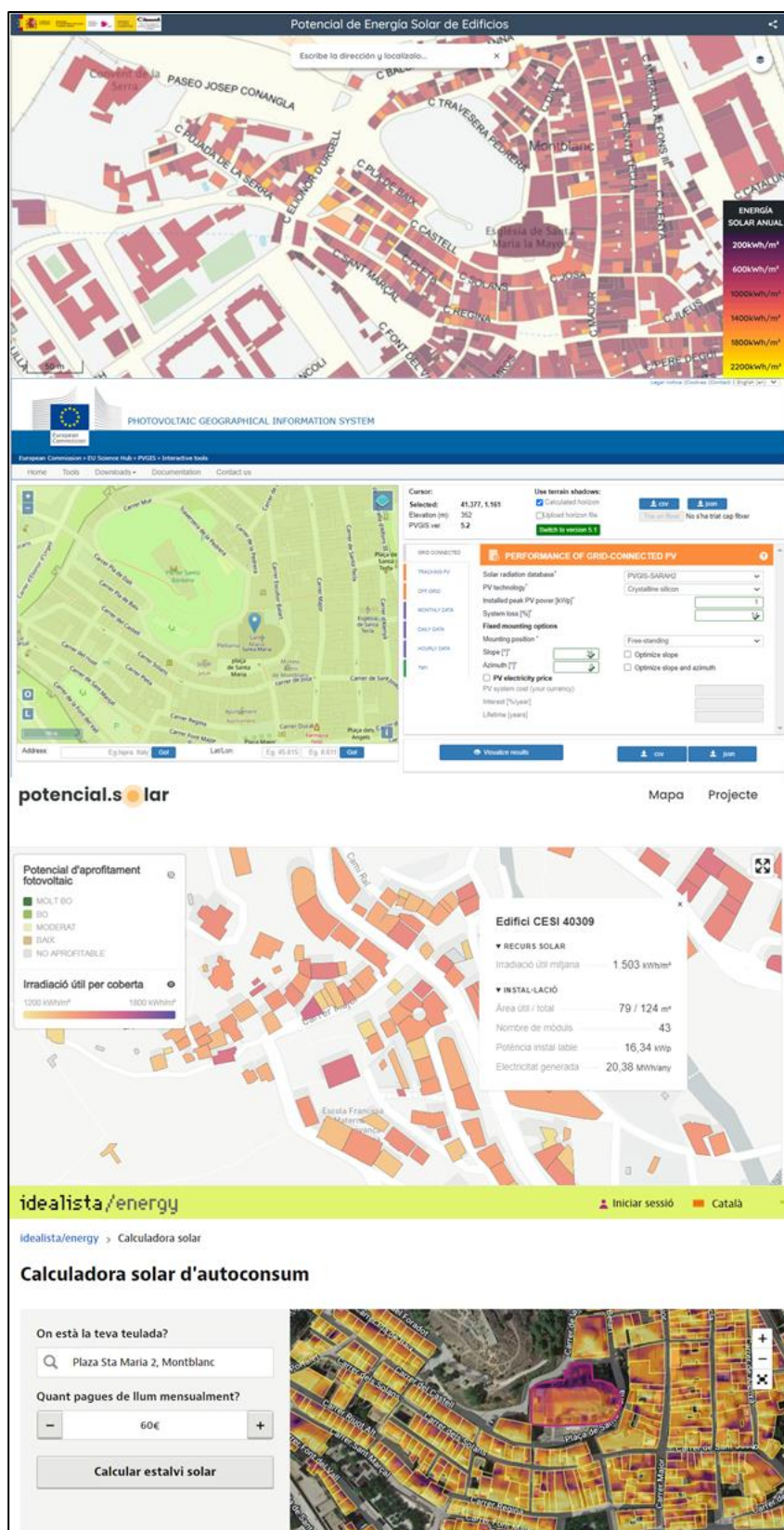


Figura 36. Visors amb el potencial d'energia solar per cobertes d'edificis. Instituto Geográfico Nacional (superior), PVGIS elaborat per la Unió Europea (mitjà superior), Potencial Solar d'Andorra Recerca i Innovació (mitjà inferior) i Idealista (inferior).

En primer lloc, el visor Potencial d'Energia Solar d'Edificis (Instituto Geográfico Nacional, 2023) permet consultar edifici per edifici (*Building*) del cadastre - al present estudi s'ha detallat a nivell de part d'edifici (*BuildingPart*) - la superfície de la coberta, l'energia solar anual acumulada, o el valor mig, màxim i mínim de l'energia obtinguda anualment per la coberta en kWh/m². El visor PVGIS (Comissió Europea, 2023) parteix d'un mapa amb la irradiació mitjana anual per metre quadrat. Per afegir, dona dades detallades de producció elèctrica FV a partir de la introducció de camps com la potència i el tipus de la instal·lació que es vol instal·lar sobre una ubicació determinada. En aquest cas, no es permet una consulta edifici per edifici a diferència del present estudi. El visor potencial solar de les cobertes dels edificis d'Andorra (Andorra Recerca + Innovació, 2021) permet consultar en un mapa interactiu la classificació edifici per edifici de sis nivells d'aprofitament fotovoltaic, la irradiació útil per coberta i informació orientativa sobre el potencial energètic, la rendibilitat econòmica i els beneficis mediambientals d'hipotètiques instal·lacions. Per a finalitzar, la calculadora solar d'autoconsum d'Idealista (Idealista/Energy, 2023) permet la consulta d'edifici per edifici, i estima les hores de sol anuals incidents, la superfície apta de la coberta, el número d'instal·lacions, la potència d'aquestes instal·lacions i dades d'estalvi econòmic en relació a la instal·lació.

Com acabem de veure, algunes d'aquestes eines poden ser de gran utilitat pels usuaris finals, no obstant això, i des de la experiència obtinguda durant la realització d'aquest treball, es considera que seria fonamental facilitar la consulta i descàrrega de tota la informació que incorporen les bases de dades creades darrere d'aquests visors. En aquest sentit, el *cadastre solar* permet consultar informació per a fer anàlisis en funció de l'escala territorial, ús de l'edifici, aptitud de la coberta, i altres característiques de les dades incorporades, o altres que es poguessin afegir.

4.3 Limitacions

Emprar models digitals de superfície d'un elevat pes en un territori significativament gran pot generar dificultats per a realitzar tasques d'edició o càlculs sobre la informació de la mateixa capa. Així mateix, capes vectorials com Parts d'Edifici (*BuildingPart*)

s'estructuren amb 41.048.496 cel·les i un pes total de l'arxiu de 3,2 GB el que denota l'exigència computacional dels processos. No obstant això, la principal problemàtica és generar models de radiació solar cada hora de varis dies per acabar produint 12 models que pesen 100 GB quan encara no estan comprimits.

En relació a l'automatització de tasques, la obtenció de dades cadastrals a partir del servei ATOM ha resultat molt convenient i àgil per a obtenir una referència cartogràfica de les cobertes d'edifici d'un territori físic significativament gran. No obstant això, mitjançant la descàrrega massiva no s'inclouen atributs associats als edificis que si que es troben a l'espai de descàrrega manual del Cadastre. Per exemple, la base de dades de cadastre permet obtenir més detall sobre els usos o activitats que afecten a cada part d'edifici, en comptes de una única categoria descriptiva. Un altre aspecte a destacar és que si bé el *cadastre solar* pretén agrupar les dades més recents possibles, **el pas del temps afectarà en l'actualització de la informació incorporada.**

Els avenços de les tecnologies fotovoltaïques podria fer variar els resultats finals d'aquest estudi. En aquest cas, per als càlculs del potencial elèctric s'ha emprat un panell fotovoltaic amb una potència unitària de 350 Wp, no obstant això, al mercat existeixen plaques fotovoltaïques amb major potència i majors dimensions, pel qual els resultats podrien diferir dels actuals. És per aquesta raó que degut a les possibles variacions de la producció elèctrica fotovoltaica en relació a canvis tecnològics, s'ha decidit crear les gràfiques d'embut (Figura 17) a partir dels valors del sumatori de radiació incident sobre totes les cobertes.

Una altra problemàtica detectada són les desviacions espacials entre diferents capes. Sovint les ortofotografies presenten distorsions que no permeten visualitzar amb precisió i en certs casos generen imprecisions d'uns quants metres que afecten a l'hora d'aplicar tècniques de teledetecció. Un exemple on les distorsions han afectat els resultats ha estat la relocalització d'instal·lacions fotovoltaïques a partir de la visualització de cobertes del cadastre no coincidents amb les cobertes observades a les ortofotografies; com destaca Kausika *et al.*, (2021) seria recomanable emprar imatges àrees d'alta resolució (10 cm). Per afegir, també s'ha observat l'absència de cobertes a la base del cadastre que si apareixen a les ortofotografies més actualitzades (Figura 37).

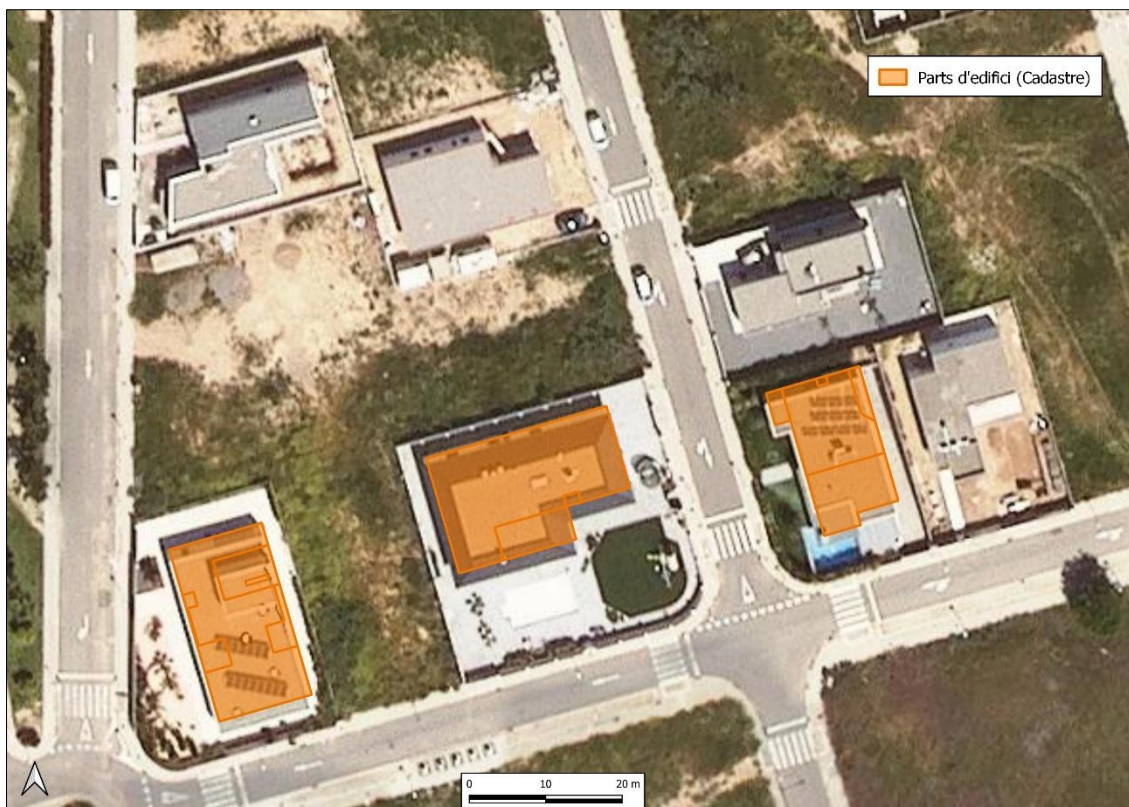


Figura 37. Cobertes d'edificis detectades amb ortofotografies actuals sobre el municipi de Riudoms, però no incorporades a la base del cadastre. Font: Capa BuildingPart del servei de descàrrega ATOM (DG del Catastro, 2023).

Complementàriament, s'han identificat cobertes del cadastre així com instal·lacions fotovoltaïques no incorporades a les respectives bases de dades a partir de tècniques de teledetecció manual mitjançant l'ortofotografia més recent de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC, 2021). També són remarcables les distorsions generades en algunes de les façanes al model digital de superfícies derivat de les dades LiDAR (Redweik *et al.*, 2013). Per minimitzar l'efecte d'aquesta última distorsió, s'ha exclòs del càlcul metre exterior de les cobertes a partir del camp “[bp_core_area_1m]”. En aquest estudi, s'han exclòs també elements com patis de llum, terrats massa petits o altres estructures a partir de l'aplicació de filtres a les expressions de càlcul d'aptitud de coberta en cinc escenaris, no obstant això, és possible que algunes estructures no aptes no hagin quedat excloses, o que s'hagin exclòs cobertes potencialment aptes.

La manca d'actualització de les dades relacionades amb l'estudi així com la baixa periodicitat en la publicació de dades actualitzades pot generar buits d'informació. Arran

que la informació cartogràfica de la base de dades del Cadastre s'actualitza a la primera setmana de febrer i d'agost anualment, neix la necessitat d'actualitzar periòdicament els models i resultats generats en aquest estudi. També convé destacar que la base de dades sobre instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic de l'Institut Català de l'Energia incorpora aquelles instal·lacions donades d'alta fins el mes de març del 2022. Segons dades de la mateixa font, en un any a la província de Tarragona s'ha passat de 10.988 instal·lacions fotovoltaïques l'any 2021 a 33.097 l'any posterior. Amb tot plegat, segons l'augment observat en les dades publicades, a mitjan 2023 és força probable que el nombre de noves instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic no identificades i per tant no incorporades en aquesta base de dades sigui prou significativa.

Tot i que Freitas *et al.*, (2015) destaca tenir en compte que els requisits d'instal·lació i les limitacions reglamentàries impliquen una varietat de criteris que no sempre es poden avaluar exclusivament a partir de les dades disponibles. En aquest cas s'ha realitzat una proposta d'elaboració de *cadastre solar* amb models de radiació solar, la base de dades del cadastre i les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic; per contra, no s'han incorporat elements tècnics relacionats amb normativa o reglamentació referent a la instal·lació de panells solars.

Per a finalitzar, en relació als escenaris plantejats, la limitació de temps m'ha impedit crear més escenaris en funció de més variables; per exemple, ús de l'edifici, renda bàsica mitjana per secció censal, així com altres factors socials. També hagués estat d'interès recollir la retroacció per part d'experts en tecnologies fotovoltaïques i en transició energètica o validar exhaustivament els possibles errors que s'haguessin pogut generar en la introducció d'una nova variable al *cadastre solar*.

5. Conclusions i propostes de treball futur

En una futura recerca seria recomanable una **millora de la resolució espacial i temporal del model de radiació solar**. És clau, actualitzar els models de radiació solar un cop surti la nova cobertura del model digital de superfícies (2m) generat pel Institut Geogràfic

Nacional (IGN), o estar atent a noves cobertures que també publiqui l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

En una futura recerca seria recomanable la **validació dels models de radiació solar** potencial a partir de l'encreuament sobre el mateix espai de les dades de radiació solar extretes de les estacions automàtiques i manuals del Servei Meteorològic de Catalunya. Es compararia sobre una mateixa ubicació la informació de radiació extreta de les estacions meteorològiques seleccionades, amb els valors de radiació solar del model sobre la mateixa ubicació. Les fonts de les dades serien la Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (XEMA) creada l'any 1996 la qual integra totes les estacions meteorològiques automàtiques (EMA); així com la Xarxa d'Observadors Meteorològics (XOM) creada l'any 2009 per tal d'ampliar les dades de la XEMA. Segons el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) aquestes recullen la mitjana de la irradiació solar global diària. Així mateix, un cop validades les dades del model de radiació solar anual caldria **comprovar el grau d'ajust de les dades d'estimació de producció elèctrica fotovoltaica del model** generat en aquest estudi. Per a fer aquesta segona validació, caldria obtenir la generació elèctrica d'instal·lacions fotovoltaïques i comparar resultats amb l'estimació realitzada al present treball.

Tampoc cal descartar l'**actualització recurrent de la base de dades**. Les instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic de l'ICAEN haurien d'incorporar en la mesura del possible noves instal·lacions periòdicament. Per part del Cadastre seria òptim afegir a la base de dades del *cadastre solar* les altes, les baixes o els canvis de les característiques dels edificis que conformen la capa.

Finalment, també seria interessant explorar una sortida més pràctica per als usuaris que no són experts ni tenen una base sòlida de coneixements relacionats amb els entorns de treball del Sistemes d'Informació Geogràfica. En línia amb aquesta idea, es podria **desenvolupar un entorn interactiu en forma de visor cartogràfic**. Aquesta eina seria apte per a qualsevol usuari però que tampoc limitaria l'usuari per treballar amb informació de la base de dades per a fer anàlisis més exhaustius.

Amb els resultats del present estudi es disposa pel conjunt de municipis de la província de Tarragona de la informació d'una proposta metodològica de l'estimació del potencial de generació elèctrica fotovoltaica sobre les cobertes edificades en cinc escenaris d'aptitud (de menys restrictiu a més restrictiu). Per sintetitzar, s'ha fet un exercici d'inici a la recerca, on s'han emprat dades accessibles que han permès generar un mètode per determinar una proposta d'estimació fotovoltaica i altra informació de la província de Tarragona. Així mateix, tenint presents les propostes de millora així com les llacunes de coneixement identificades, neix la **necessitat de continuar investigant i treballant en el desenvolupament de la metodologia proposada** en aquest treball.

6. Bibliografia

Àrea Metropolitana de Barcelona. (2014). Estudi del potencial de l'energia solar a l'Àmbit Metropolità de Barcelona. Recuperat de https://www3.amb.cat/repositori/PSAMB/Estudis/Potencial_energia_solar_a_l_AMB.pdf

Barron, A.R. (2015). Cost reduction in the solar industry. *Materials Today* 18(1), 2-3. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.022>.

Bódis, K., Kougias, 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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109309>.

Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A.S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., Barbosa, L., Fasihi, M., Khalili, S., Traber, T. & Breyer, C. (2021). *Energy* 227, 120467. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>

Caamaño, E. & Díaz-Palacios S. (2019). Potencial solar fotovoltaico de las cubiertas edificatorias de la Ciudad de Vitoria-Gasteiz: Caracterización y análisis. Instituto de la Energía Solar – Universidad Politécnica de Madrid. <https://www.vitoria-gasteiz.org/docs/j34/catalogo/01/85/potentialsolar19memoria.pdf>

CCMA. (2021, 9 de novembre). Allau de sol·licituds per implantar parcs solars en terrenys agrícoles de l'interior del país. Recuperat de: <https://www.ccma.cat/324/allau-de-sollicituds-per-implantar-parcs-solars-en-terrenys-agricoles-de-linterior-del-pais/noticia/3025880/>

Chen, C., Xixi, X., Ming, Y., Ilwoo, S., Zhanhu, G., Qinglong, J., Grant, W., Hang, Z. & Qibin, L. (2021). Recent Advances in Solar Energy Full Spectrum Conversion and Utilization. *ES Energy & Environment*, 11, 3–18. <http://dx.doi.org/10.30919/esee8c416>

Consell Europeu (2023). Precios de la energía y seguridad del suministro. Recuperat de: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/energy-prices-and-security-of-supply/>

DIRECTIVA 2007/2/CE del Parlament Europeu i del Consell, del 14 de març de 2007, pel que s'estableix una infraestructura d'informació espacial a la Comunitat Europea (Inspire). Diari Oficial de la Unió Europea núm. 108(1), del 25 d'abril de 2007, 1-14. <https://www.boe.es/doue/2007/108/L00001-00014.pdf>

DIRECTIVA 2018/2001 del Parlament Europeu i del Consell, de l'11 de desembre de 2018, relativa al foment de l'ús d'energia procedent de fonts renovables. Diari Oficial de la Unió Europea núm. 382(82), del 21 de desembre de 2018, 1-128. <https://www.boe.es/doue/2018/328/L00082-00209.pdf>

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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.060>.

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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.013>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.014>.

IEA (2020). World Energy Outlook 2020. International Energy Agency. Recuperat de: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi: 10.1017/9781009325844.

ICAEN. (2023a). *Prospectiva energètica de Catalunya 2050*. Generalitat de Catalunya: Institut Català de l'Energia (ICAEN). Disponible a: https://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/PROENCA_T/20230512_Proencat-2050_web_Acc.pdf

IPCC. (2023). *Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). Longer Report*. Recuperat de: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

IRENA (2019). *Renewable Capacity Statistics 2019*. Agencia Internacional de Energía Renovable. Recuperat de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2019.pdf

IRENA (2020). *Estadísticas de capacidad renovable 2020*. Agencia Internacional de Energía Renovable. Recuperat de <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020-ES>

IRENA (2022). *Renewable Capacity Statistics 2022*. Agencia Internacional de Energía Renovable. Recuperat de <https://www.irena.org/Publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>

Kausika, B., Nijmeijer, D., Reimerink, I., Brouwer., P. & Liem, V. (2021). GeoAI for detection of solar photovoltaic installations in the Netherlands. *Energy and AI* 6, 100111. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100111>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100057>.

LLEI 9/1993, de 30 de setembre, del patrimoni cultural català, Diari Oficial de la Generalitat núm. 1807, d'11 d'octubre de 1993, 1-30. <https://portaljuridic.gencat.cat/eli/es-ct/l/1993/09/30/9>.

LLEI 16/2017, de l'1 d'agost, del canvi climàtic, Diari Oficial de la Generalitat núm. 7426, del 3 d'agost de 2017. <https://portaljuridic.gencat.cat/eli/es-ct/l/2017/08/01/16>

Lukovic, J., Bajat, B., Kilibarda, M. & Filipovic, D. (2015). High resolution grid of potential incoming solar radiation for Serbia. *Thermal Science* 19, 134-134. <https://doi.org/10.2298/TSCI150430134L>

McGarigal, K. (2015). FRAGSTATS Help. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats.help.4.2.pdf>

Melius, J., Margolis, R. & Ong, S. (2013). Estimating Rooftop Suitability for PV: A Review of Methods, Patents, and Validation Techniques. *United States*. <https://doi.org/10.2172/1117057>

Nationalgrid (2023, May 16). Energy explained. Recuperat de: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/how-does-solar-power-work>

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(12), 3506. <https://doi.org/10.3390/en11123506>.

Pareja, X. (2022). Estas son las causas que hay detrás de la subida de la factura de la luz. El Periódico. <https://www.elperiodico.com/es/sociedad/20220919/por-que-sube-precio-luz-espana-14428356>

Quirós, E., Pozo, M. & Ceballos, J. (2018). Solar potential of rooftops in Cáceres city, Spain. *Journal of Maps* 14(1), 44–51. <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1456487>

Redweik, P., Catita, C. & Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy* 97, 332-341. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.036>.

REE (2022). La eólica y la fotovoltaica batien récord de generación eléctrica en España en 2022. Red Eléctrica de España. Recuperat de: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2022/12/la-eolica-y-fotovoltaica-batien-record-de-generacion-electrica-en-espana-en-2022>

Saladié, Ò., Saladié, S., Salvat, Ll., Zaragoza, B., 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 en 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).

Saladié, S. (2021). El model d'implantació de les energies renovables en el context de transició energètica a Catalunya. Lo Floc verd. 405046-Text de l'article-590848-1-10-20221013.pdf

Santos, F.D., Lopes, P. & Pedersen, J.S.T. (2022). The Climate Change Challenge: A Review of the Barriers and Solutions to Deliver a Paris Solution. *Climate* 2022, 10(5), 75. <https://doi.org/10.3390/cli1005007>

Statista (2023). Precio medio final anual de la electricidad en España de 2010 a 2022. Recuperat de: <https://es.statista.com/estadisticas/993787/precio-medio-final-de-la-electricidad-en-espana/>

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(1), 394. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00739-0>

Šúri, M., Huld, T.A., Dunlop E.D. & Ossenbrink, H.A. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy* 81(10), 1295-1305. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.007>.

Torres-Rivas, A., Palumbo, M., Jimenez, L. & Boer, D. (2022). Self-consumption possibilities by rooftop PV and building retrofit requirements for a regional building stock: The case of Catalonia. *Solar Energy* 238, 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.036>.

Travesset-Baro, O., Vilella, M. & Borges, P. (2021). Hacia la autosuficiencia energética en las ciudades. Análisis del potencial solar fotovoltaico a escala urbana en el Principado de Andorra. *CienciAmérica* 10(3), 1-16. <http://dx.doi.org/10.33210/ca.v10i3.369>

Yin, H. & Zhou, K. (2022). Performance evaluation of China's photovoltaic poverty alleviation project using machine learning and satellite images. *Utilities Policy* 76, 101378. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101378>.

Zaragozí B., Trilles & S., Navarro-Carrión J.T. (2020). Leveraging Container Technologies in a GIScience Project: A Perspective from Open Reproducible Research. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9(3), 138. <https://doi.org/10.3390/ijgi9030138>

Zaragozí, B., Saladié, O., Salvat, Ll., Saladié, S., Rovira, M.T. & Blay, J. (2022). 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. Grup de Recerca en Anàlisi Territorial i Estudis Turístics. Departament de Geografia de la Universitat Rovira i Virgili. Projecte 2022/22. Conveni marc DIPTA-URV 2020-2023).

7. Recursos temàtics

Andorra Recerca + Innovació (2021). Visor “Coneix el potencial solar de les cobertes dels edificis d'Andorra”. Recuperat de: <https://www.potencial.solar/>

Comissió Europea (2023). Photovoltaic geographical information System: PVGIS. Recuperat de: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

CNIG [IGN] (2021). Modelo digital de superficies (MDS05). Centro de Descargas de l'Instituto Geográfico Nacional. <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

DG del Catastro (2023). Servicios ATOM de conjuntos de datos predefinidos INSPIRE. Recuperat de: <https://www.catastro.minhap.es/webinspire/index.html>

ICAEN (2023b). Observatori de l'autoconsum a Catalunya. Generalitat de Catalunya: Institut Català de l'Energia (ICAEN). Recuperat de: <https://icaen.gencat.cat/ca/energia/autoconsum/Observatori-de-lautoconsum-a-catalunya/>

ICGC (2018). Mapa de Cobertes del sòl. Generalitat de Catalunya: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Recuperat de: <https://www.icgc.cat/Descarregues/Mapes-en-format-d-imatge/Cobertes-del-sol>

ICGC (2021). Ortofotomapa escala 1:5000. Generalitat de Catalunya: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Recuperat de: <https://www.icgc.cat/es/Descargas/Imagenes-aereas-y-de-satelite/Ortofoto-convencional>

ICGC (2023). Mapes municipals (escala 1:5000). Generalitat de Catalunya: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Recuperat de: <https://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Descarregues/Capes-de-geoinformacio/Mapes-municipals>

Idealista/Energy (2023). Calculadora d'autoconsum fotovoltaic. Recuperat de: <https://www.idealista.com/ca/energy/calculadora-de-ahorro-solar/>

IEC (2023). BCIN: Estadística del patrimoni arquitectònic i arqueològic Institut d'Estadística de Catalunya. Recuperat de: <https://www.idescat.cat/pub/?id=bcin>

INE (2022). Población residente por fecha, sexo y edad. Instituto Nacional de Estadística. Recuperat de: <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=9687&L=0>

Instituto Geográfico Nacional (2023). Visor del Potencial de Energía Solar de Edificios. Recuperat de: <https://eficiencia-energetica.ign.es/solar/>

8. Annexos

```
--ESCENARI 1

If

( "bp_shape_index" > 1 AND "bu_shape_index" > 1 AND

    "bp_shape_index" < 4 AND "bu_shape_index" < 4 AND

    "bu_fractal_dimension" < 2 AND "bp_fractal_dimension" < 2.3 AND

    "bu_numberOfFloorsAboveGround" >0 AND

    "bp_core_area_1m"> 10 AND

    "bu_conditionOfConstruction" = 'functional' AND NOT

    ("bu_numberOfFloorsAboveGround" <= 3 AND

    "bu_numberOfFloorsAboveGround_max" > 2 AND

    "bu_numberOfFloorsAboveGround" < "bu_numberOfFloorsAboveGround_mean"

    AND "bp_core_area_1m" < ("bu_area_m2"*50)/100)

    AND "solrad_year_mean_kwh" > 800

    AND "solrad_dec_mean_kwh" > 20

    AND left("bu_beginning",4)>1800

    TRUE,

    FALSE

)
```

Figura 38. Codi de definició de l'escenari I d'aptitud de les cobertes.

```
--ESCENARI 2

if
(
    "bp_shape_index" > 1 AND "bu_shape_index" > 1 AND
    "bp_shape_index" < 4 AND "bu_shape_index" < 4 AND
    "bu_fractal_dimension" < 2 AND "bp_fractal_dimension" < 2.3 AND
    "bu_numberOfFloorsAboveGround" >0 AND
    "bp_core_area_1m"> 10 AND
    "bu_conditionOfConstruction" = 'functional' AND NOT
    ("bu_numberOfFloorsAboveGround" <= 3 AND
    "bu_numberOfFloorsAboveGround_max" > 2 AND
    "bu_numberOfFloorsAboveGround" < "bu_numberOfFloorsAboveGround_mean"
    AND "bp_core_area_1m" < ("bu_area_m2"*50)/100)
    AND "solrad_year_mean_kwh" > 900
    AND "solrad_dec_mean_kwh" > 30
    AND left("bu_beginning",4)>1850
    AND "bic_name" IS NULL

    TRUE,

    FALSE

)
```

Figura 39. Codi de definició de l'escenari II d'aptitud de les cobertes.

```
--ESCENARI 3

if
(
  "bp_shape_index" > 1 AND "bu_shape_index" > 1 AND
  "bp_shape_index" < 4 AND "bu_shape_index" < 4 AND
  "bu_fractal_dimension" < 2 AND "bp_fractal_dimension" < 2.3 AND
  "bu_numberOfFloorsAboveGround" >0 AND
  "bp_core_area_1m"> 10 AND
  "bu_conditionOfConstruction" = 'functional' AND NOT
  ("bu_numberOfFloorsAboveGround" <= 3 AND
  "bu_numberOfFloorsAboveGround_max" > 2 AND
  "bu_numberOfFloorsAboveGround" < "bu_numberOfFloorsAboveGround_mean"
  AND "bp_core_area_1m" < ("bu_area_m2"*50)/100)
  AND "solrad_year_mean_kwh" > 1000
  AND "solrad_dec_mean_kwh" > 40
  AND left("bu_beginning",4)>1900
  AND "bic_name" IS NULL

  TRUE,

  FALSE

)
```

Figura 40. Codi de definició de l'escenari III d'aptitud de les cobertes.

```
--ESCENARI 4

if

(      "bp_shape_index" > 1 AND "bu_shape_index" > 1 AND

      "bp_shape_index" < 4 AND "bu_shape_index" < 4 AND

      "bu_fractal_dimension" < 2 AND "bp_fractal_dimension" < 2.3 AND

      "bu_numberOfFloorsAboveGround" >0 AND

      "bp_core_area_1m"> 10 AND

      "bu_conditionOfConstruction" = 'functional' AND NOT

      ("bu_numberOfFloorsAboveGround" <= 3 AND

      "bu_numberOfFloorsAboveGround_max" > 2 AND

      "bu_numberOfFloorsAboveGround" < "bu_numberOfFloorsAboveGround_mean"

      AND "bp_core_area_1m" < ("bu_area_m2"*50)/100)

      AND "solrad_year_mean_kwh" > 1100

      AND "solrad_dec_mean_kwh" > 50

      AND left("bu_beginning",4)>1950

      AND "bic_name" IS NULL

      TRUE,

FALSE

)
```

Figura 41. Codi de definició de l'escenari IV d'aptitud de les cobertes.

```
--ESCENARI 5

if

("bp_shape_index" > 1 AND "bu_shape_index" > 1 AND

"bp_shape_index" < 4 AND "bu_shape_index" < 4 AND

"bu_fractal_dimension" < 2 AND "bp_fractal_dimension" < 2.3 AND

"bu_numberOfFloorsAboveGround" >0 AND

"bp_core_area_1m"> 10 AND

"bu_conditionOfConstruction" = 'functional' AND NOT

("bu_numberOfFloorsAboveGround" <= 3 AND

"bu_numberOfFloorsAboveGround_max" > 2 AND

"bu_numberOfFloorsAboveGround" < "bu_numberOfFloorsAboveGround_mean"

AND "bp_core_area_1m" < ("bu_area_m2"*50)/100)

AND "solrad_year_mean_kwh" > 1200

AND "solrad_dec_mean_kwh" > 60

AND left("bu_beginning",4)>1950

AND "bic_name" IS NULL

TRUE,

FALSE

)
```

Figura 42. Codi de definició de l'escenari V d'aptitud de les cobertes.

```

#!/bin/bash

for i in "${!monthnames[@]}"; do

    echo "=====
"

    echo "START: ${monthnames[$i]^} at $(date +"%Y-%m-%d %H:%M:%S")"

    SECONDS=0

    echo "COMMAND: saga_cmd ta_lighting 2 \\"

    echo " -GRD_DEM $DSM \\"

    echo " -GRD_SVF $SVF \\"

    echo " -GRD_DIRECT $outdir/radsol-direct-05-${monthnames[$i]}.sdat \\"

    echo " -GRD_DIFFUS $outdir/radsol-difuse-05-${monthnames[$i]}.sdat \\"

    echo " -SOLARCONST 1367 \\"

    echo " -LATITUDE 41.1 \\"

    echo " -PERIOD 'range of days' \\"

    echo " -DAY 2023-01-01 \\"

    echo " -DAY_STOP 2023-01-${lastdays[$i]} \\"

    echo " -DAYS_STEP 5 \\"

    echo " -HOUR_RANGE_MIN ${sunrise[$i]}.000000 \\"

    echo " -HOUR_RANGE_MAX ${sunset[$i]}.000000 \\"

    echo " -HOUR_STEP 1"

    saga_cmd ta_lighting 2 \

    -GRD_DEM $DSM \

```

```

-GRD_SVF $SVF \
    -GRD_DIRECT $outdir/radsol-direct-05-${monthnames[$i]}.sdat \
    -GRD_DIFFUS $outdir/radsol-difuse-05-${monthnames[$i]}.sdat \
    -SOLARCONST 1367 \
    -LATITUDE 41.1 \
    -PERIOD "range of days" \
    -DAY 2023-01-01 \
    -DAY_STOP 2023-01-${lastdays[$i]} \
    -DAYS_STEP 5 \
    -HOUR_RANGE_MIN ${sunrise[$i]}.000000 \
    -HOUR_RANGE_MAX ${sunset[$i]}.000000 \
    -HOUR_STEP 2

duration=$SECONDS

echo "END: $((($duration / 60)) minutes and $((($duration % 60)) seconds)."

echo "===== "

echo ""

#####

sleep 60 #

#####

done

```

Figura 43. Codi per automatitzar la generació de models de radiació solar mensuals.

