

MAPPATURA DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI E POSSIBILE SPIAZZAMENTO DELL'ATTIVITÀ AGRICOLA



Firenze, Dicembre 2024

RICONOSCIMENTI

Lo studio è stato commissionato a IRPET dall'Autorità di Gestione del FEASR ed è stato svolto nell'ambito delle attività comuni tra IRPET e la suddetta Autorità di Gestione previste per il 2024 (Attività N. 5.2024). Esso è stato svolto da ARCO (Action Research for CO-development) per l'area "Settori produttivi e imprese" dell'IRPET, con il contributo di ideazione e disegno di Marco Mariani e Sara Turchetti.

Gli autori del report sono: Federico Martellozzo (coordinatore scientifico, ARCO); Andrea Ferrannini (ARCO); Matteo Dalle Vaglie (ARCO); Leonardo Borsacchi (ARCO); Gabriele Feligioni (ARCO); Chiara Vita (ARCO).

L'allestimento editoriale è stato curato da Elena Zangheri (IRPET).

Indice

ABSTRACT	5
1. INTRODUZIONE.....	7
2. MATERIALI E METODI	7
3. QUADRO NORMATIVO	8
4. CARATTERIZZAZIONE CARTOGRAFICA DEI PROCESSI AUTORIZZATIVI DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI A TERRA DI GRANDI DIMENSIONI.....	9
4.1 Potenza cumulata installata grandi impianti.....	9
4.2 Potenza cumulata grandi impianti con VIA in essere	10
4.3 Potenza cumulata grandi impianti con VIA + installato	11
4.4 Stato di realizzazione grandi impianti con VIA e tipo di procedimento	13
5. INDICE DI COMPATIBILITÀ TERRITORIALE PER IMPIANTI FOTOVOLTAICI A TERRA DI GRANDI DIMENSIONI....	15
6. SCENARI DI SVILUPPO DEI PARCHI SOLARI IN TOSCANA	19
6.1 Scenari.....	19
6.2 Discussione.....	24
6.3 Analisi per provincia	27
7. LA SCELTA DELL'AGRIVOLTAICO IN TOSCANA	27
8. CONCLUSIONI E IMPLICAZIONI	31
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	32

ABSTRACT

“MAPPATURA DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI E POSSIBILE SPIAZZAMENTO DELL’ATTIVITÀ AGRICOLA”

Il consumo di suolo agricolo per impianti fotovoltaici a terra in Italia, pari al 9,5% dei 4.000 ettari persi nel 2023, ha sollevato riflessioni anche in Toscana, dove il contributo è stato di circa l’1%. Il presente report analizza la diffusione delle autorizzazioni degli impianti di grandi dimensioni in Toscana, evidenziando l’impatto di vincoli paesaggistici e normative, come il DM "Aree Idonee" e il Decreto Agricoltura. Utilizzando un modello di machine learning, vengono proposti scenari per una pianificazione equilibrata che consideri protezione del paesaggio, potenziale energetico e sviluppo sostenibile, promuovendo soluzioni integrate e un approccio *place-based*. Gli scenari proposti tengono conto dell’evoluzione normativa (in particolare le distanze minime degli impianti da vincoli paesaggistici) e del fabbisogno energetico. Si ottiene un quadro per provincia che potrà essere utile ai decisori politici regionali. Una pianificazione energetica territoriale ben calibrata, sostenuta da una governance locale efficace, sarà essenziale per bilanciare l’adozione di soluzioni di fotovoltaico e agrivoltaico e garantire una transizione energetica sostenibile e armoniosa.

"MAPPING OF PHOTOVOLTAIC PLANTS AND POTENTIAL DISPLACEMENT OF AGRICULTURAL ACTIVITY"

The consumption of agricultural land for ground-mounted photovoltaic systems in Italy, accounting for 9.5% of the 4,000 hectares lost in 2023, has prompted also reflections in Tuscany, where the contribution was approximately 1%. This report examines the distribution of permits for large-scale systems in Tuscany, highlighting the impact of landscape constraints and regulations such as the DM "Aree Idonee" and the "Decreto Agricoltura". Using a machine learning model, the report proposes scenarios for balanced planning that consider landscape protection, energy potential, and sustainable development, promoting integrated solutions and a place-based approach. The proposed scenarios account for regulatory developments (notably minimum distances from landscape constraints) and energy needs, offering a province-level framework useful for regional policymakers. Well-calibrated territorial energy planning, supported by effective local governance, will be essential to balance the adoption of photovoltaic and agrivoltaic solutions, ensuring a sustainable and harmonious energy transition.

1. INTRODUZIONE

Nel 2023, in Italia, sono stati persi 4.000 ettari di suolo agricolo a causa di abbandoni, cementificazioni e cambi di destinazione d'uso, come evidenziato nel Rapporto ISPRA 2024. Tra questi, circa 400 ettari (9,5% del totale consumato) sono stati convertiti per l'installazione di impianti fotovoltaici a terra. A livello geografico, il Centro Italia ha registrato una quota limitata, pari al 13,5% del suolo agricolo consumato per fotovoltaico, con Umbria, Marche e Toscana che hanno contribuito marginalmente (circa l'1% ciascuna). Il fenomeno interessa prevalentemente aree rurali con agricoltura intensiva (51%), soprattutto in pianura e collina, con un forte impatto economico e produttivo. Nel Centro-Nord, il 95% delle superfici agricole convertite riguarda seminativi, rispetto al 77% del Sud, dove si registra anche una maggiore incidenza di colture permanenti (20%). Complessivamente, la copertura nazionale con fotovoltaico ha raggiunto 18.000 ettari tra suoli agricoli ed extra-agricoli, con un valore stimato dei terreni agricoli convertiti nel 2023 di circa 9,7 milioni di euro.

L'evoluzione normativa sull'individuazione delle aree idonee per impianti fotovoltaici a terra riflette il tentativo del legislatore di bilanciare la transizione energetica con la tutela del territorio. Il recente Decreto Ministeriale del 21 giugno 2024, in attuazione del D.Lgs. 199/2021, distingue tra aree idonee, non idonee e ordinarie, con l'obiettivo di agevolare l'installazione di impianti rinnovabili pur rispettando vincoli paesaggistici e ambientali. Parallelamente, il Decreto Agricoltura n. 63/2024 introduce restrizioni per le aree agricole, promuovendo soluzioni integrate come l'agrivoltaico. È un quadro che si modifica in questi mesi, lasciando alle Regioni il compito di decidere sulle autorizzazioni di grandi impianti fotovoltaici su terreni agricoli presentate prima del Decreto Agricoltura e in corso di valutazione. Le amministrazioni regionali si trovano dunque a prendere una decisione cercando di bilanciare tutela ambientale, sviluppo delle rinnovabili e richieste da parte delle imprese. Gli orientamenti regionali sembrerebbero al momento andare in direzioni diverse, con ad esempio Lombardia, Piemonte, Friuli-Venezia Giulia ed Emilia-Romagna più flessibili nel concedere le autorizzazioni, mentre la Sardegna ha preferito una moratoria di 18 mesi.

In Toscana, il Consiglio Regionale ha promosso un approccio partecipativo per l'individuazione delle aree idonee agli impianti fotovoltaici a terra, coinvolgendo attivamente i comuni, anche in forma aggregata, per garantire una gestione integrata del territorio. La mozione n. 1763 del 17 settembre 2024 impegna la Giunta regionale a collaborare con i comuni per identificare aree idonee, non idonee, ordinarie e vietate, tutelando il paesaggio agricolo e riducendo i conflitti. Questo approccio si allinea con il Programma Regionale di Sviluppo 2021–2025, che mira a bilanciare la produzione di energia pulita con la protezione del paesaggio e delle comunità locali, valorizzando le aree agricole di pregio e i paesaggi rurali per la sostenibilità ambientale ed economica regionale.

Il presente rapporto analizza la diffusione geografica degli impianti fotovoltaici a terra di grandi dimensioni (>1 MW) in Toscana, considerando sia l'installato al 2023 sia i progetti in corso di autorizzazione. L'obiettivo è creare una mappa dettagliata della compatibilità territoriale per nuovi impianti, utilizzando un algoritmo di machine learning e un indice sintetico (0-1) basato su fattori geografici, ambientali, economici e normativi. Le mappe, realizzate con dati storici e attuali supportano scenari prospettici per la pianificazione del fotovoltaico, bilanciando potenziale tecnico e vincoli normativi, e offrono una visione strategica per lo sviluppo sostenibile della regione.

2. MATERIALI E METODI

Le carte presentate in questo rapporto si riferiscono a dati inerenti alla diffusione geografica degli impianti fotovoltaici a terra in Toscana. Il focus specifico interessa solamente gli impianti di grandi dimensioni (cioè, quelli con potenza superiore a 1 MW). I dati sorgente riguardano l'installato corrente

al 2023 (fonte: GSE), e lo status dei progetti in corso di realizzazione per i quali vi è in essere un processo autorizzativo (in via di valutazione o concluso. Fonte: Regione Toscana). Il dettaglio geografico di riferimento è l'aggregato comunale.

Obiettivo di questo studio è la creazione di una cartografia spazialmente esplicita della compatibilità territoriale per l'installazione di impianti fotovoltaici a terra di grandi dimensioni (>1 MW), con una risoluzione spaziale di 100 metri. Per la modellazione è stato utilizzato un algoritmo di machine learning. La variabile di risposta, ovvero la carta dell'indice di compatibilità, è stata ricavata a partire dai dati forniti dal progetto Global Solar Inventory, ospitato dalla piattaforma Descartes Labs. Questo dataset offre informazioni dettagliate sulla distribuzione spaziale degli impianti fotovoltaici esistenti. Le variabili esplicative utilizzate nel modello sono state selezionate sulla base di un'ampia revisione della letteratura scientifica e includono fattori geografici, ambientali, economici e normativi, considerati rilevanti per la presenza di impianti fotovoltaici.

Il risultato finale consiste in una mappa che rappresenta la compatibilità del territorio toscano per l'installazione di impianti fotovoltaici, espressa come un indice sintetico compreso tra 0 e 1. Questo indice si basa su un'analisi di co-occorrenza delle variabili esplicative rispetto alla presenza di impianti simili negli ultimi venti anni, al fine di identificare le condizioni territoriali favorevoli che possono ancora essere sfruttate oggi. Tale intervallo è stato scelto al fine di ovviare alla limitazione della non disponibilità dell'anno di costruzione di ogni impianto, e si è ritenuto ragionevole utilizzare un gap temporale sufficientemente ampio per poter considerare adeguatamente le condizioni territoriali preesistenti, e quindi prodromiche, allo sviluppo degli impianti negli anni successivi. Successivamente, dalla mappa sono state eliminate tutte le aree ricadenti in vincoli paesaggistici, archeologici e naturalistici (ad esempio, aree protette o soggette a protezione speciale), garantendo un risultato finale conforme ai criteri di conservazione e tutela ambientale.

Le carte così ottenute sono state utilizzate per implementare diversi scenari prospettici di potenziale installazione del fotovoltaico, fornendo uno strumento utile per la pianificazione territoriale e la valutazione ambientale. Questo approccio integrato permette di offrire una visione strategica del possibile sviluppo del fotovoltaico nella regione Toscana, tenendo conto sia del potenziale tecnico che dei recenti vincoli normativi e paesaggistici.

3. QUADRO NORMATIVO

Il quadro normativo per l'individuazione delle aree idonee all'installazione di impianti da fonti rinnovabili, compresi gli impianti fotovoltaici a terra, è disciplinato dal Decreto Ministeriale 21 giugno 2024 del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. Questo decreto, emanato in attuazione dell'articolo 20 del Decreto Legislativo n. 199 dell'8 novembre 2021, ha l'obiettivo di contribuire al raggiungimento degli obiettivi nazionali ed europei di transizione energetica, tra cui l'incremento di 80 GW di capacità da fonti rinnovabili entro il 2030, in linea con il PNIEC e i target dei pacchetti europei "Fit for 55" e "Repower EU".

Il decreto distingue tre tipologie di aree:

1. Aree idonee: soggette a iter autorizzativi agevolati per la realizzazione degli impianti e delle infrastrutture connesse.
2. Aree non idonee: escluse per incompatibilità con l'installazione di impianti, sulla base di vincoli ambientali o di uso del suolo.
3. Aree ordinarie: dove si applicano le procedure autorizzative standard.

Secondo il Decreto Aree idonee, inoltre, le Regioni possono stabilire una fascia di rispetto dal perimetro dei beni sottoposti a tutela, differenziando l'ampiezza in base al tipo di impianto, da un minimo di 500 metri fino a un massimo di 7 chilometri. La misura riguarda nello specifico l'articolo 7, comma 2, lettera C, che consente alle Regioni di salvaguardare o dichiarare non idonee le aree incluse nell'articolo 20, comma 8, del D.Lgs. 199/2021. Quest'ultimo stabilisce che sono da considerarsi idonee tutte le aree che non ricadono nei confini di beni tutelati ai sensi del Codice dei Beni Culturali o nelle fasce di rispetto, definite per quelli fotovoltaici.

Con l'approvazione del Decreto Agricoltura n. 63/2024, entrato in vigore il 16 maggio 2024, sono stati introdotti nuovi limiti per l'installazione di impianti fotovoltaici con moduli a terra su terreni agricoli produttivi. L'obiettivo principale del decreto è quello di bilanciare lo sviluppo delle energie rinnovabili con la tutela delle aree agricole, favorendo un'integrazione tra l'attività agricola e la produzione di energia solare. Il decreto stabilisce un divieto generale per l'installazione di nuovi impianti fotovoltaici su suolo agricolo, salvo alcune eccezioni. Sono infatti consentiti gli impianti finanziati dal PNRR, i progetti di agrivoltaico e quelli collocati in specifiche aree come cave, miniere, concessioni ferroviarie e aeroportuali, zone limitrofe alle autostrade e siti industriali.

In Toscana, il Consiglio Regionale ha sottolineato l'importanza di coinvolgere attivamente i comuni nel processo di individuazione delle aree idonee per questo tipo di impianti, in modo da garantire una gestione integrata e sostenibile del territorio. La mozione n. 1763, approvata il 17 settembre 2024, impegna la Giunta regionale a collaborare con i comuni, anche in forma aggregata per zone omogenee, affinché possano proporre soluzioni in merito all'identificazione delle aree idonee, non idonee, ordinarie e delle zone in cui è vietata l'installazione di fotovoltaico a terra.

Questo approccio mira a tutelare il paesaggio agricolo e a ridurre eventuali conflitti, valorizzando la conoscenza territoriale dei comuni e rafforzando il principio di sussidiarietà. Il Programma Regionale di Sviluppo 2021–2025, infatti, sottolinea come l'identificazione delle aree per impianti rinnovabili debba avvenire in equilibrio tra la necessità di contribuire alla produzione di energia pulita e la protezione delle caratteristiche ambientali, economiche e sociali delle comunità locali. In Toscana, particolare attenzione è posta alla tutela delle aree agricole di pregio e dei paesaggi rurali, essenziali sia per la sostenibilità ambientale sia per l'economia regionale.

Oltre alla recente evoluzione normativa, contribuisce a creare un clima di incertezza l'ordinanza del Consiglio di Stato del 14 novembre 2024 che ha sospeso, in via cautelare, la disposizione del Decreto Aree Idonee relativa all'installazione di impianti fotovoltaici in prossimità di beni sottoposti a tutela. L'ordinanza del Consiglio di Stato implica che le aree al di fuori di tali fasce devono essere ritenute idonee in base alla normativa statale, limitando così la possibilità per le Regioni di dichiararle inidonee con provvedimenti propri. Con questa decisione, il Consiglio di Stato riduce il margine di discrezionalità regionale, uniformando il quadro normativo a livello nazionale.

4. CARATTERIZZAZIONE CARTOGRAFICA DEI PROCESSI AUTORIZZATIVI DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI A TERRA DI GRANDI DIMENSIONI

4.1 Potenza cumulata installata grandi impianti

I comuni toscani ospitano attualmente impianti di grandi dimensioni, con potenza cumulata generalmente modesta. Solo in pochi comuni la potenza cumulata è superiore ai 5 MW, come evidenzia la tabella 1.

La carta seguente (figura 1) descrive la distribuzione geografica della potenza cumulata dei grandi impianti fotovoltaici con potenza maggiore ad 1 MW) installati al 2023.

Figura 1.

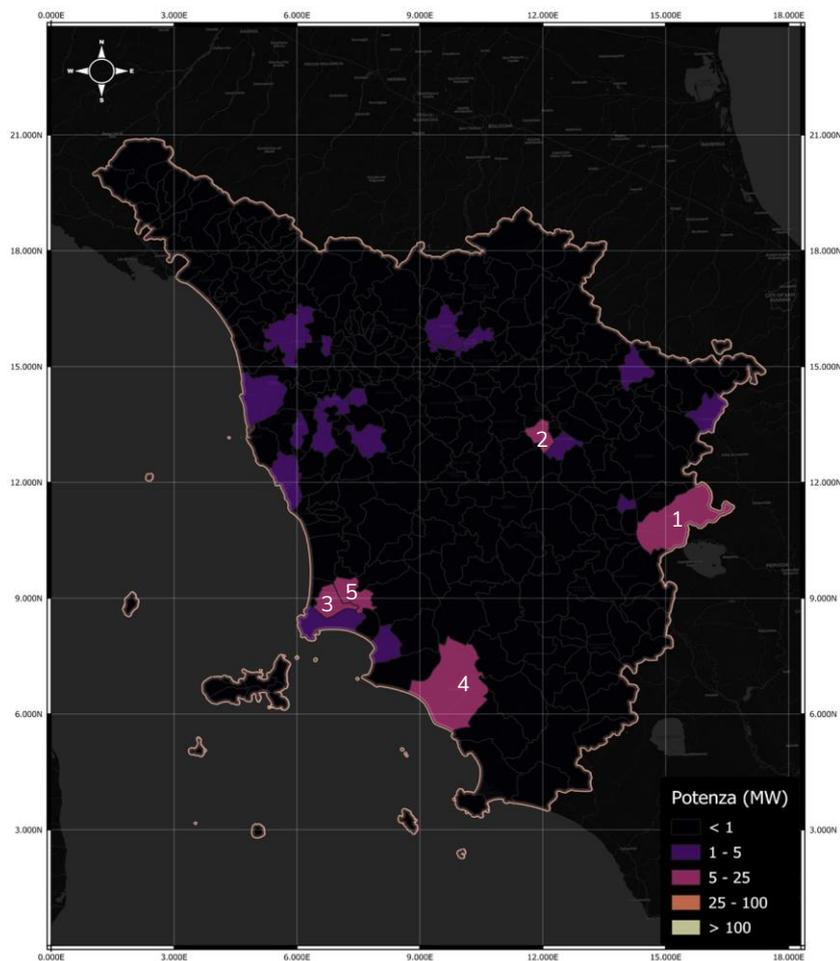


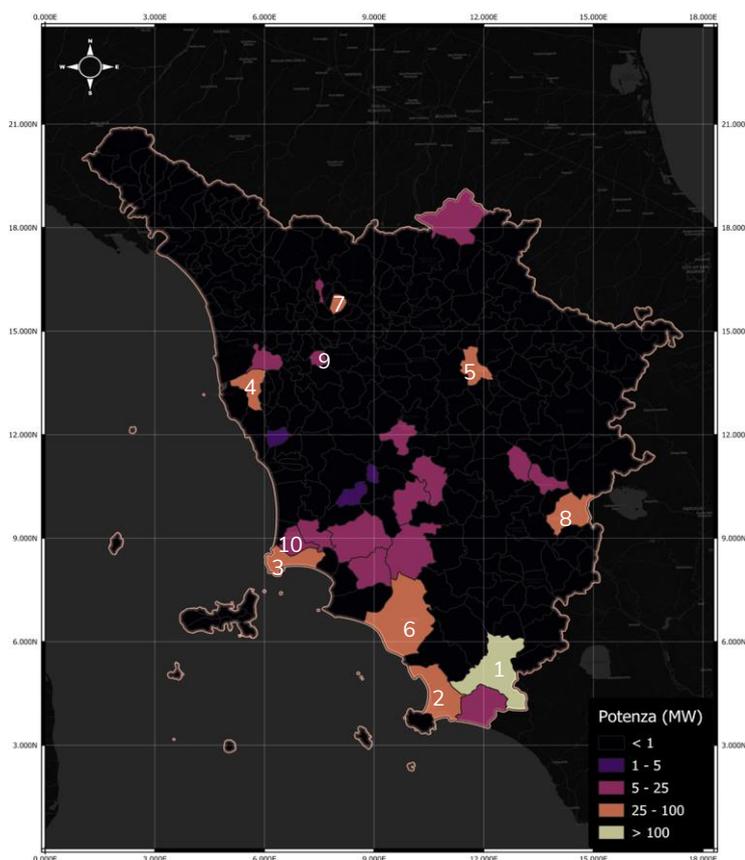
Tabella 1.

COMUNE	RANK	MW
CAVRIGLIA (AR)	1	19,05
CORTONA (AR)	2	10,50
CAMPIGLIA MARITTIMA (LI)	3	6,30
GROSSETO (GR)	4	6,27
SUVERETO (LI)	5	6,13

4.2 Potenza cumulata grandi impianti con VIA in essere

In Toscana, dai dati con noi condivisi da Regione Toscana, risultano 26 progetti di impianti fotovoltaici e agrivoltaici, attualmente in fase di approvazione. Questi impianti, distribuiti in diverse aree della regione, da Grosseto (inclusi i confini con la provincia di Viterbo) a Livorno, Siena, Firenze e Pisa, avranno potenze che variano tra 2,24 MW e oltre 85 MW. La carta in figura 2 descrive la distribuzione geografica della potenza cumulata dei grandi impianti fotovoltaici con potenza superiore a 1 MW per i quali vi è attualmente una VIA in essere.

Figura 2.



Il numero di comuni che potrebbero potenzialmente ospitare impianti di grandi dimensioni è concentrato prevalentemente verso il centro sud della Regione. I primi cinque del ranking superano abbondantemente gli 80 MW, con quello nel comune di Manciano (rank 1) unico a superare i 250 MW, come elencato in dettaglio in tabella 2.

Tabella 2.

COMUNE	RANK	MW
MANCIANO (GR)	1	278,88
ORBETELLO (GR)	2	97,3
PIOMBINO (LI)	3	95,53
COLLESALVETTI (LI)	4	89,13
FIGLINE E INCISA VALDARNO (FI)	5	84
GROSSETO (GR)	6	59,1
MONSUMMANO TERME (PT)	7	59
MONTEPULCIANO (SI)	8	26,6
MONTOPOLI IN VAL D'ARNO (PI)	9	24
CAMPIGLIA MARITTIMA (LI)	10	19,9

4.3 Potenza cumulata grandi impianti con VIA + installato

Se consideriamo la potenza cumulata dei grandi impianti fotovoltaici per i quali vi è attualmente una VIA in essere e l'installato corrente, la distribuzione geografica non cambia sostanzialmente dalla carta precedente. La tabella 3 riporta il cumulato di MW.

Tabella 3.

COMUNE	RANK	MW
MANCIANO (GR)	1	278,88
PIOMBINO (LI)	2	98,88
ORBETELLO (GR)	3	97,30
COLLESALVETTI (LI)	4	89,13
FIGLINE E INCISA VALDARNO (FI)	5	84,00
GROSSETO (GR)	6	65,37
MONSUMMANO TERME (PT)	7	59,00
MONTOPOLI IN VAL D'ARNO (PI)	8	28,31
MONTEPULCIANO (SI)	9	26,60
CAMPIGLIA MARITTIMA (LI)	10	26,20

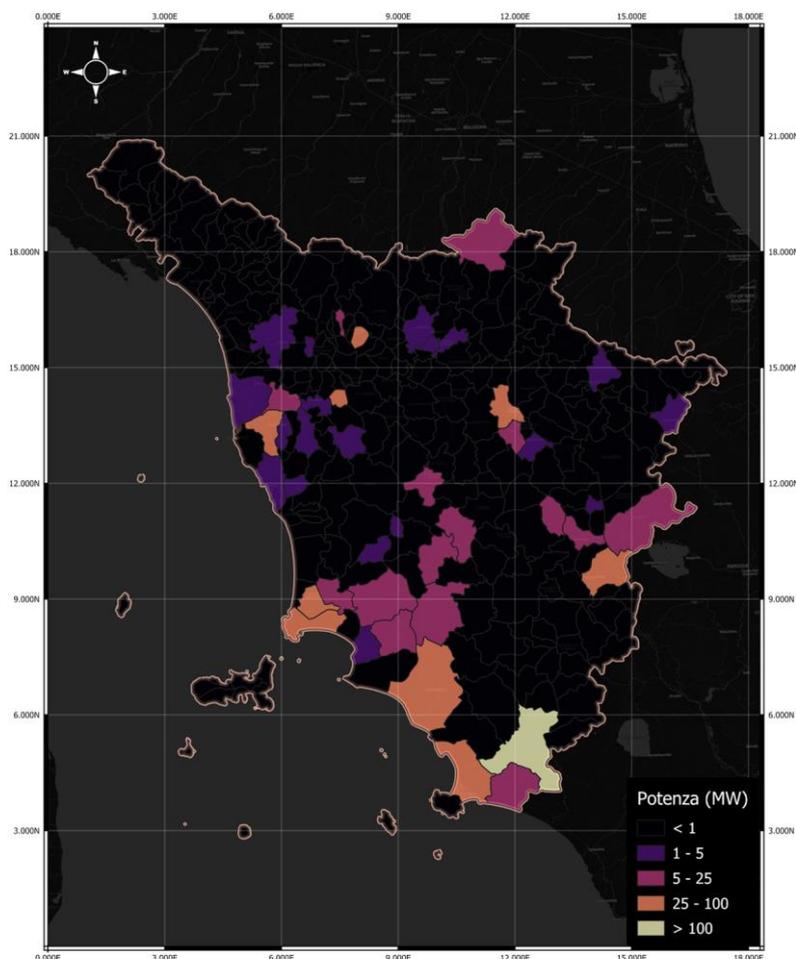
Aggregando per provincia si ottiene una prevalenza in provincia di Grosseto, seguita da Livorno, come indicato in tabella 4.

Tabella 4.

PROVINCIA	RANK	MW installato	MW con VIA	MW totale
GROSSETO	1	6,27	435,28	441,55
LIVORNO	2	12,43	207,56	239,89
FIRENZE	3	-	84	84
PISTOIA	4	-	59	59
AREZZO	5	29,55	-	29,55
SIENA	6	-	26,6	26,6
PISA	7	-	24	24
PRATO	8	-	-	-
LUCCA	9	-	-	-
MASSA CARRARA	10	-	-	-

La carta in figura 3 descrive la distribuzione geografica della potenza cumulata, indicando come il fenomeno sia guidato dalle VIA potenzialmente realizzabili e non dallo status quo di quanto correntemente installato.

Figura 3.



4.4 Stato di realizzazione grandi impianti con VIA e tipo di procedimento

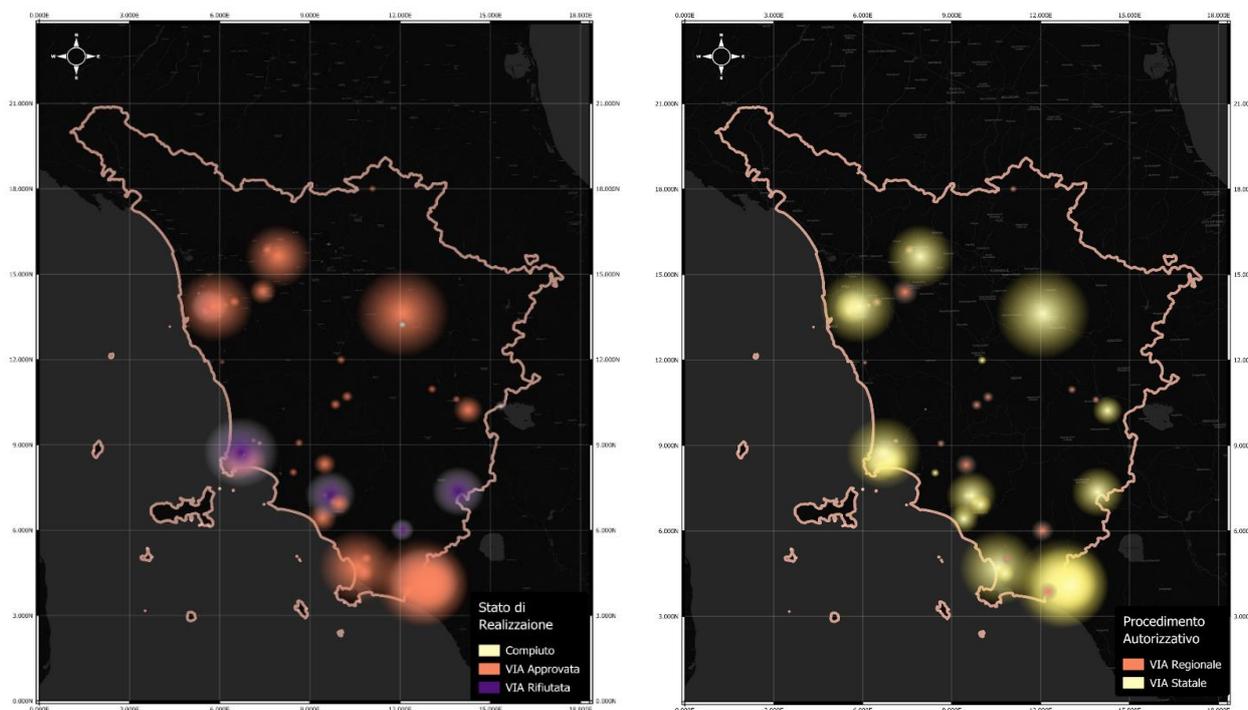
La maggior parte degli impianti fotovoltaici approvati si concentra a Manciano, con sei richieste, tra cui 2 impianti rispettivamente di 85,12 MW e 76,71 MW. Anche a Figline Valdarno (84 MW) e Orbetello (69,9 MW) sono stati approvati impianti di grandi dimensioni. Alcuni progetti, come quelli di Campiglia Marittima (67 MW) e Grosseto (44,99 MW), sono stati rifiutati. In tabella 5, si può notare come nessuno fra i primi 20 impianti (ranking per potenza) risulta installato, con lo stato di realizzazione che varia da approvato a rifiutato. La distribuzione geografica riflette quanto osservato in precedenza. Per la maggior parte degli impianti fotovoltaici di grandi dimensioni elencati nella tabella 5, come quelli a Manciano (85,12 MW e 76,71 MW) e Figline Valdarno (84 MW), è stata richiesta una VIA statale, probabilmente vista la potenza molto elevata. In totale, 19 dei primi 20 impianti per potenza hanno richiesto una VIA statale. Solo per un impianto localizzato a Montopoli Val d'Arno (24 MW) è stata richiesta invece una VIA regionale. Indicati in verde, le autorizzazioni per impianti agrivoltaici.

Tabella 5.

COMUNE	MW	STATUS	PROCEDIMENTO
MANCIANO (GR)	85.12	Approvato	Statale
FIGLINE VALDARNO (FI)	84	Approvato	Statale
MANCIANO (GR)	76.71	Approvato	Statale
ORBETELLO (GR)	69.9	Approvato	Statale
COLLESALVETTI (LI)	68	Approvato	Statale
CAMPIGLIA MARITTIMA (LI)	67	Rifiutato	Statale
MANCIANO (GR)	62.3	Rifiutato	Statale
MONSUMMANO TERME (PT)	59	Approvato	Statale
SAN CASCIANO DEI BAGNI (SI)	46.8	Rifiutato	Statale
MANCIANO (GR)	45	Approvato	Statale
GROSSETO (GR)	44.99	Rifiutato	Statale
MANCIANO (GR)	44.5	Approvato	Statale
PIOMBINO (LI)	33.83	Approvato	Statale
COLLESALVETTI (LI)	32.12	Rifiutato	Statale
PIOMBINO (LI)	32	Approvato	Statale
MANCIANO (GR)	27.55	Approvato	Statale
MONTEPULCIANO (SI)	26.6	Approvato	Statale
GROSSETO (GR)	25.9	Approvato	Statale
MONTOPOLI VAL D'ARNO (PI)	24	Approvato	Regionale
PIOMBINO (LI)	22	Approvato	Statale

La carta in figura 4 descrive lo stato di realizzazione e la localizzazione dei grandi impianti fotovoltaici per i quali è stata richiesta una VIA. La carta descrive anche la natura del procedimento autorizzativo e la localizzazione dei grandi impianti fotovoltaici.

Figura 4. Nella carta a sinistra stato di realizzazione degli impianti di cui è stata chiesta autorizzazione; nella carta a destra la natura del procedimento autorizzativo



5. INDICE DI COMPATIBILITÀ TERRITORIALE PER IMPIANTI FOTOVOLTAICI A TERRA DI GRANDI DIMENSIONI

Per la costruzione dell'indice di compatibilità per l'installazione di pannelli solari, è stato adottato un modello di machine learning basato su *Random Forest*, una tecnica supervisionata particolarmente adatta per problemi di classificazione e regressione grazie alla sua capacità di gestire dati non lineari e variabili eterogenee (Breiman, 2001; Cutler A., et al. 2012; Fawagreh, K. Et al., 2014). Il modello ha raggiunto un'accuratezza globale pari a 0,92, indicando un'elevata capacità predittiva. Le variabili indipendenti utilizzate sono state calcolate a vent'anni prima rispetto alla data stimata di installazione degli impianti fotovoltaici. Questo approccio è stato adottato per individuare le condizioni territoriali esistenti prima della realizzazione degli impianti, al fine di identificare le caratteristiche ambientali, topografiche e climatiche che maggiormente favoriscono l'installazione del fotovoltaico. Tale metodologia consente di applicare il modello predittivo ai dati attuali, individuando i territori che oggi presentano caratteristiche analoghe e che, pertanto, risultano potenzialmente idonei a ospitare ulteriori impianti fotovoltaici. Il modello è stato calibrato sull'intero territorio italiano, integrando un'ampia varietà di condizioni geografiche e climatiche. Tuttavia, i risultati finali sono stati focalizzati sulla regione Toscana, consentendo un'analisi più dettagliata e mirata per il contesto locale. La variabile dipendente, ossia la presenza o l'assenza di impianti fotovoltaici, è stata derivata dal database riportato in Nature (Kruitwagen et al., 2021).

Le variabili indipendenti sono state suddivise in sei categorie principali: indice di vegetazione, prossimità e protezione, topografia, copertura del suolo, irraggiamento e temperatura, e riflettanza spettrale. La loro importanza relativa (*feature importance*) nel modello è riportata nella tabella 6 seguente:

Tabella 6. Importanza relativa (*feature importance*)

CATEGORIA	VARIABILE	DESCRIZIONE	FEATURE IMPORTANCE
Indice di vegetazione	EVI	Indice di Vegetazione Ottimizzato	4,17%
	NDVI	Indice di Vegetazione Normalizzato	4,11%
	NDWI	Indice di Umidità Normalizzato	4,05%
	NDBI	Indice di Urbanizzazione Normalizzato	4,15%
Prossimità e protezione	AREE PROTETTE	Prossimità aree protette	30,59%
	TERNA	Distanza rete di distribuzione energia	4,64%
Topografia	ELEVATION	Altitudine	4,57%
	ASPECT	Esposizione Nord	4,33%
	SLOPE	Pendenza suolo	3,08%
	HILLSHADE	Ombreggiatura del rilievo	3,41%
Copertura del suolo	LANDCOVER	Copertura del suolo	2,35%
Irraggiamento e temperatura	GTI	Irraggiamento Globale sul Piano Inclinato	4,49%
Riflettanza spettrale	TEMP	Temperatura media a terra	4,04%
	BLUE	Riflettanza banda blu (visibile)	4,23%
	GREEN	Riflettanza banda verde (visibile)	4,20%
	RED	Riflettanza banda rosso (visibile)	0,41%
	NIR	Riflettanza vicino infra-rosso	4,34%
	SWIR1	Infrarosso a Onde Corte 1	4,30%
	SWIR2	Infrarosso a Onde Corte 2	4,53%

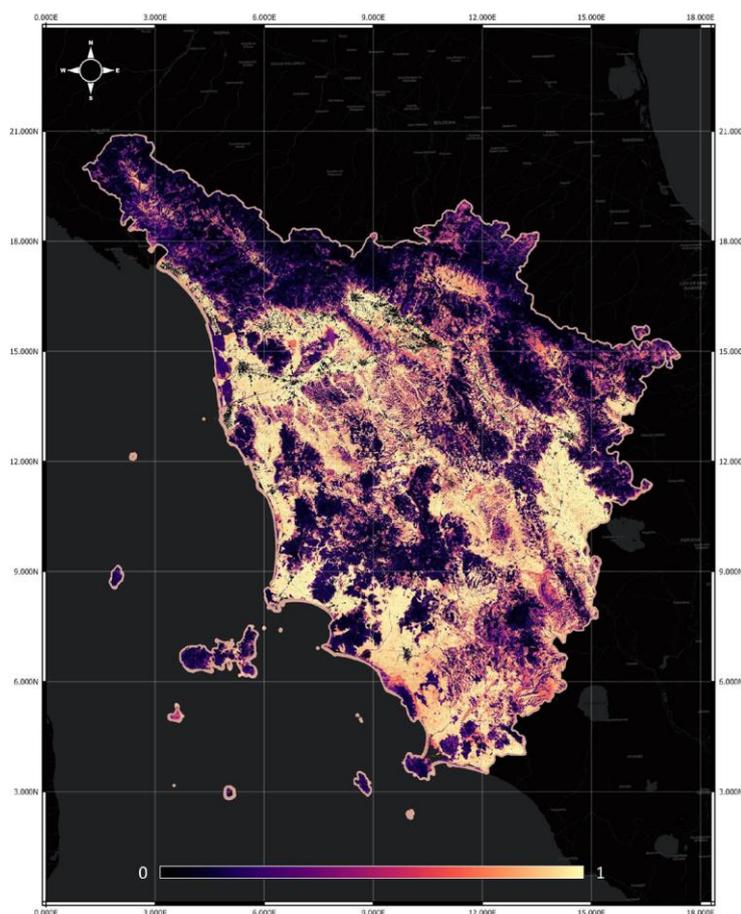
Tra le variabili indipendenti, la prossimità alle aree protette ha mostrato il contributo maggiore al modello con una *feature importance* pari al 30,59%. Altre variabili rilevanti includono la distanza dalla rete di distribuzione energetica e le componenti spettrali. Questo approccio integrato ha permesso di costruire un indice robusto e applicabile a scenari di pianificazione energetica territoriale.

Passando alla rappresentazione cartografica dei dati, la carta in figura 5 rappresenta la compatibilità territoriale per l'installazione di impianti fotovoltaici in Toscana, calcolata tramite l'indice di compatibilità derivato dall'analisi di machine learning con il modello *Random Forest*. L'indice è visualizzato su una scala cromatica che va dal viola scuro (bassa compatibilità, indice vicino a 0) al giallo chiaro (alta compatibilità, indice vicino a 1).

Di seguito, una presentazione sommaria dei principali elementi visibili:

1. Distribuzione spaziale della compatibilità. Le aree con maggiore compatibilità (tonalità giallo-arancione) si concentrano principalmente nelle zone centrali e meridionali della Toscana. Ciò può essere attribuito a caratteristiche favorevoli come: Maggiore disponibilità di terreni pianeggianti o con pendenza moderata. Irraggiamento solare elevato, tipico delle aree più meridionali della regione. Minore presenza di vincoli legati ad aree protette.
2. Le zone meno compatibili (viola scuro) si trovano prevalentemente nelle aree montuose e collinari settentrionali, come le Alpi Apuane e l'Appennino Tosco-Emiliano, dove pendenza e ombreggiatura influenzano negativamente la compatibilità. Nelle aree densamente urbanizzate o coperte da boschi e vegetazione densa.

Figura 5: indice di compatibilità per potenziale installazione parchi solari



Nella carta seguente (figura 6) si è provveduto alla sovrapposizione dell'indice di compatibilità con progetti con VIA approvata o in corso. La carta rappresenta una selezione dei territori con un **indice di compatibilità superiore a 0,95**. Sono escluse le aree attualmente sotto vincolo paesaggistico, architettonico e archeologico, evidenziando quindi le aree particolarmente idonee per l'installazione di impianti fotovoltaici di grandi dimensioni. Le croci bianche indicano i siti dove sono in corso le procedure di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) per progetti di grandi parchi solari a terra. Ecco alcune osservazioni chiave:

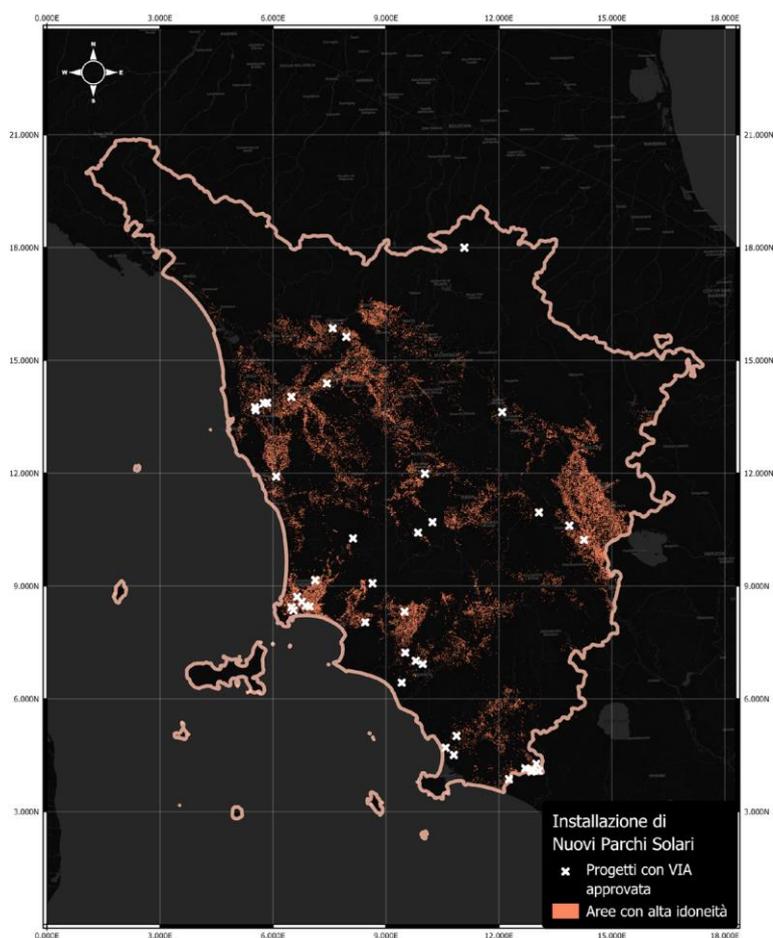
1. Distribuzione delle aree con alta idoneità

- Le aree con compatibilità elevata (colorate in arancione) sono distribuite principalmente nelle zone centrali e meridionali della Toscana, coerentemente con le caratteristiche climatiche e geomorfologiche favorevoli di queste aree.
- L'elevato indice di compatibilità in queste aree suggerisce che presentano condizioni ambientali, territoriali e infrastrutturali ideali per ospitare grandi impianti fotovoltaici.

2. Concentrazione delle proposte con VIA

- Le croci bianche che rappresentano i progetti sottoposti a VIA si sovrappongono in larga parte con le aree di alta idoneità. Questa correlazione dimostra che gli operatori del settore tendono a individuare le stesse aree favorevoli per nuovi sviluppi, come confermato dall'analisi del modello.

Figura 6: Aree ad elevata compatibilità, escluse le aree sotto vincolo con localizzazione progetti con VIA



Emerge dunque che le aree più idonee si trovano prevalentemente in terreni agricoli coltivati, ma un approccio strategico dovrebbe privilegiare i terreni marginali o ritirati per evitare conflitti con la produzione agricola e preservare il valore delle colture permanenti. Questa analisi evidenzia la necessità di politiche mirate che incentivino l'uso di superfici già dismesse o a bassa pressione d'uso agricolo per uno sviluppo sostenibile del fotovoltaico. A livello aggregato regionale, nelle aree ad alta idoneità per l'installazione di parchi solari (indice > 0,95), con l'esclusione delle aree sotto vincoli paesaggistici e simili, si evidenziano i seguenti impieghi agricoli (fonte: ARTEA):

- Terreni agricoli coltivati (78,3%): Foraggere (27,0%), cereali (26,3%), e seminativi (25,0%) rappresentano la grande maggioranza delle aree idonee. Questi terreni condividono caratteristiche favorevoli, come la scarsa pendenza, la buona esposizione e una pressione d'uso relativamente bassa, rendendoli particolarmente adatti per lo sviluppo del fotovoltaico.
- Colture permanenti (13,1%): Comprende viti (6,2%), olivo (4,3%) e altri permanenti (2,6%). Questi terreni sono meno rappresentati, probabilmente per il loro maggiore valore economico e culturale, che ne rende la conversione meno appetibile.
- Terreni non agricoli o marginali (8,6%): Terreni ritirati dall'agricoltura (6,3%) e altro (2,3%). Questi terreni offrono un'opportunità interessante per minimizzare l'impatto sulle aree produttive, consentendo l'uso di superfici già marginali o abbandonate.

Considerando invece la distribuzione dell'uso del suolo nelle aree con un elevato indice di idoneità per l'installazione di parchi solari, escludendo un buffer di 500 metri dalle aree soggette a vincolo paesaggistico (effetto del Decreto "Aree Idonee"), a livello regionale aggregato troviamo:

- Principali categorie di uso del suolo. Cereali (32,9%) e seminativi (32,9%): Questi terreni continuano a rappresentare la maggior parte delle aree idonee anche dopo l'esclusione del buffer. Questo dato suggerisce che le aree agricole a basso livello di specializzazione restano le più adatte per l'installazione di parchi solari, grazie alle loro caratteristiche geomorfologiche (pianura, buona esposizione).
- Foraggere (19,1%): Anche questa classe agricola rimane significativa, con una quota rilevante. I terreni foraggeri sono spesso utilizzati in modo meno intensivo e risultano più facilmente riconvertibili. Permanenti (4,2%) e olivo (2,5%): Le colture permanenti e gli oliveti hanno una rappresentanza minore, probabilmente a causa del loro valore economico, culturale e paesaggistico, che ne limita l'idoneità alla conversione.
- Terreni ritirati (5,6%): I terreni dismessi o non più utilizzati per l'agricoltura rappresentano una piccola ma significativa opportunità per lo sviluppo del fotovoltaico, minimizzando i conflitti con l'uso agricolo attivo. Altro (2,7%) e vite (2,0%): Le aree marginali o meno comuni, come i vigneti, costituiscono una quota molto ridotta, a conferma della loro scarsa idoneità o preferenza per scopi alternativi.

L'esclusione di un buffer di 500 metri dalle aree protette esclude una quota significativa di terreni inizialmente idonei, portando a una redistribuzione della rappresentatività delle categorie di uso del suolo. La forte presenza di colture cerealicole e seminative nelle aree rimanenti sottolinea la predominanza di terreni agricoli "generici" nelle zone di alta idoneità non protette, mentre le colture più pregiate o sensibili (es. vite e olivo) risultano generalmente preservate.

Riassumendo,

Tabella 7: Uso del suolo

USO DEL SUOLO	AREE AD ALTA IDONEITÀ PER L'INSTALLAZIONE DI PARCHI SOLARI (Ha)	AREE CON UN ELEVATO INDICE DI IDONEITÀ, ESCLUDENDO BUFFER DI 500 METRI DALLE AREE SOGGETTE A VINCOLO PAESAGGISTICO (Ha)
altro	498	6.733
cereali	22.275	77.750
seminativi	22.272	73.907
ritirati	2.851	18.734
permanenti	3.791	7.559
vite	1.324	18.161
foraggiere	12.883	79.649
olivo	1.722	12.756

Occorre rimarcare che le normative che prevedono buffer più ampi (fino a 7 km) dalle aree soggette a vincolo paesaggistico, potrebbero ridurre ulteriormente le aree disponibili, rendendo necessaria una strategia più precisa per l'identificazione di terreni adatti. Se tali regole fossero adottate, l'impatto sarebbe particolarmente significativo in Toscana, dove molte aree idonee potrebbero sovrapporsi (o essere vicine) a vincoli paesaggistici importanti.

Dal punto di vista strategico, con la possibile riduzione delle aree idonee a causa delle normative, sarà cruciale ottimizzare l'uso dei terreni rimanenti, con un focus particolare sui terreni ritirati e sui terreni agricoli a minor valore economico (foraggiere, seminativi). La mappatura e l'analisi spaziale continueranno a giocare un ruolo fondamentale per garantire che le decisioni siano informate e bilanciate tra lo sviluppo del solare e la protezione del paesaggio e dell'agricoltura.

6. SCENARI DI SVILUPPO DEI PARCHI SOLARI IN TOSCANA

6.1 Scenari

Si effettuano di seguito alcune ipotesi al fine di problematizzare il potenziale di *upscaling* dei parchi solari a terra per il territorio toscano. A fronte di un consumo annuo regionale di 20.282 GWh (Fonte: Arpat, 2021), nel 2021, la Toscana ha prodotto complessivamente 16.735 GWh di energia elettrica (Terna). Di questa, le fonti rinnovabili rappresentano il 51% dell'offerta regionale (Terna) (al fotovoltaico si deve solo il 10%), e circa il 38-42% della domanda regionale.

Si prendono dunque in considerazione i seguenti due scenari:

Scenario 1: Lo sviluppo di parchi solari interviene solo sulle aree attualmente ritirate dalla produzione

Scenario 2: lo sviluppo di parchi solari avviene sulle aree attualmente ritirate dalla produzione ad esclusione delle aree che ricadono in un buffer di 500 metri da elementi territoriali attualmente soggetti a vincolo paesaggistico architettonico e archeologico.

Per entrambi si provvede a calcolare la proporzione necessaria per il raggiungimento di tre possibili obiettivi:

- **Obiettivo 1:** 50% del consumo mediante rinnovabili,
- **Obiettivo 2:** Obiettivo ufficiale al 2030,
- **Obiettivo 3:** Neutralità Carbonica al 2050.

La tabella 8 riporta le ipotesi in funzione delle quali i 3 obiettivi sono stati implementati. Per ambedue gli scenari sono stati confrontati i tre diversi obiettivi, e ne è stata calcolata la superficie necessaria in percentuale relativa.

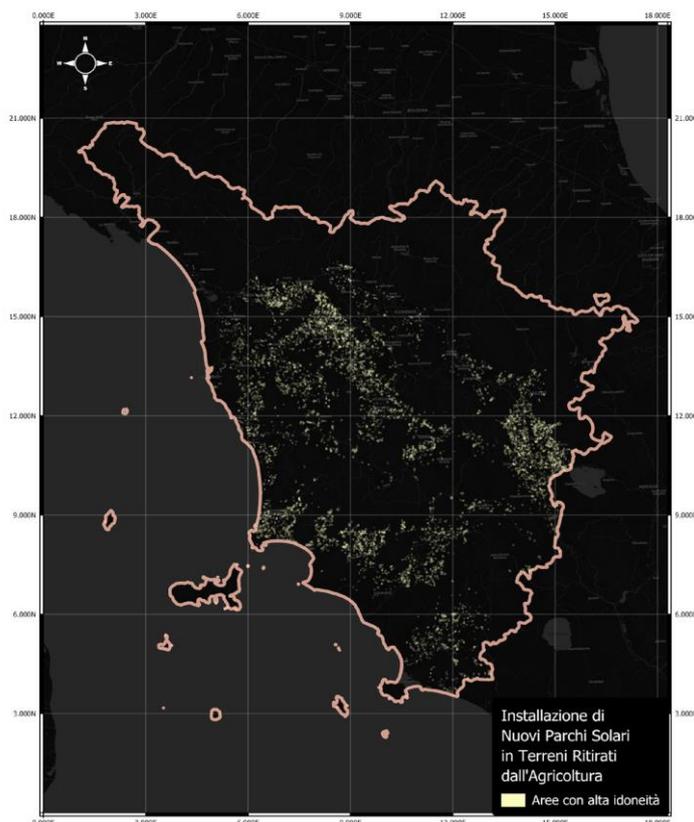
Tabella 8: Coefficienti per la strutturazione delle ipotesi alla base dell'esercizio di potential upscaling evaluation

PRODUZIONE ANNUA MQ MEDIA TOSCANA	243,33 kWh/m ² /anno
SPAZIATURA PANNELLI	20 %
ALTRE PERDITE DEL SISTEMA	15 %
OBIETTIVO SOLARE (2030)	4,25 (~5.100 - 5.900 GWh/anno)
TOTALE CONSUMO TOSCANA	20.282,00 GWh/anno
ATTUALE PRODUZIONE RINNOVABILE	38% - 42% Consumo Toscana
OBIETTIVO EMISSIONI ZERO (2050)	11.750 – 12.574,8 GWh/anno

Scenario 1. Focus su terreni ritirati dalla produzione

La carta in figura 7 rappresenta una selezione specifica delle aree con alta idoneità per l'installazione di parchi solari che ricadono esclusivamente in terreni ritirati dall'agricoltura (~18.000 Ha). La scelta di focalizzarsi su queste aree riflette un approccio mirato alla sostenibilità, riducendo il conflitto tra lo sviluppo delle energie rinnovabili e l'uso agricolo del suolo.

Figura 7: Carta delle aree con elevato indice di adeguatezza per l'installazione di parchi solari che ricadono in terreni agricoli attualmente ritirati dalla produzione



Distribuzione delle aree ritirate. Le aree evidenziate in giallo rappresentano i territori con un indice di compatibilità (*suitability index*) elevato (superiore a 0.95) che sono classificati come terreni non più destinati a uso agricolo. Queste aree si concentrano principalmente: Nelle zone centrali e meridionali della Toscana, che già mostrano un alto potenziale per il solare a terra grazie a condizioni favorevoli

come irraggiamento elevato e topografia adeguata. In prossimità di aree non urbanizzate, riducendo il rischio di conflitti con insediamenti umani.

Concentrarsi su terreni ritirati dall'agricoltura rappresenta una strategia chiave per:

- Evitare il consumo di terreni agricoli produttivi, garantendo che le attività agricole tradizionali non vengano sacrificate per il solare.
- Utilizzare terreni sottoutilizzati o marginali, trasformandoli in risorse per la transizione energetica.

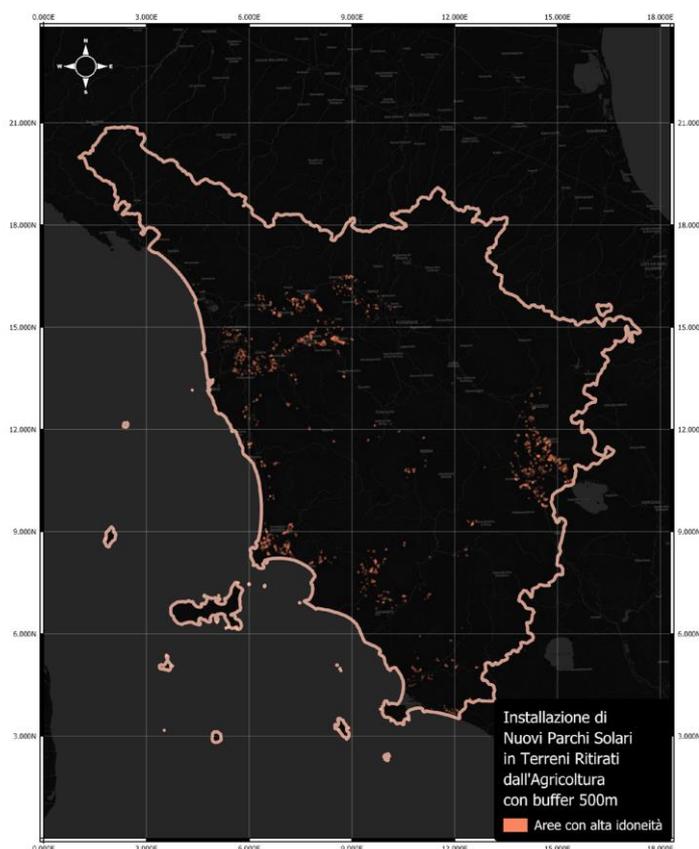
Questo approccio aiuta a bilanciare le esigenze di produzione alimentare e sviluppo energetico, rispondendo alle criticità spesso sollevate nei dibattiti sulla sostenibilità del fotovoltaico a terra.

Benché frammentata, la distribuzione delle aree di questo scenario interessa la quasi totalità del territorio regionale, ad eccezione come logico delle aree montane più interne.

Scenario 2. Focus su terreni ritirati dalla produzione con buffer di 500 m dalle aree soggette a vincolo

La carta in figura 8 evidenzia le aree con elevato indice di idoneità per parchi solari situate esclusivamente su terreni agricoli ritirati dalla produzione, ed escludendo le aree entro un buffer di 500 metri dalle zone soggette a vincolo paesaggistico (La normativa nazionale indica un limite massimo di 7 km).

Figura 8: Carta delle aree con elevato indice di adeguatezza per l'installazione di parchi solari che ricadono in terreni agricoli attualmente ritirati dalla produzione ad esclusione dei terreni in un buffer di 500m dalle aree soggette a vincolo paesaggistico



L'introduzione combinata delle restrizioni (terreni ritirati e buffer) porta ad una drastica riduzione delle aree idonee, con significativa limitazione delle aree disponibili, lasciando poche superfici potenzialmente sfruttabili.

Le aree rimanenti sono distribuite in modo disperso, spesso lontane dai centri principali di produzione agricola e caratterizzate da superfici ridotte. Tuttavia, possiamo maggiormente notare come queste si concentrino maggiormente nel centro nord, est, e in misura minore nella parte sud-costiera della Regione.

A livello di impatti sulla pianificazione, questa restrizione sottolinea la necessità di una pianificazione strategica più inclusiva, che possa integrare soluzioni alternative (es. tetti fotovoltaici) per raggiungere gli obiettivi energetici senza sacrificare altre funzioni territoriali.

Quindi, l'esclusione di queste aree evidenzia un severo vincolo per la realizzazione di nuovi parchi solari, richiedendo approcci più flessibili per bilanciare le esigenze di tutela del territorio e sviluppo delle energie rinnovabili.

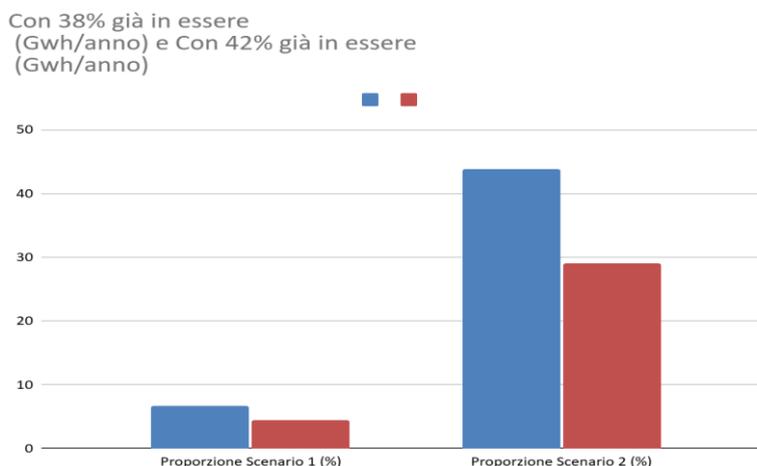
Obiettivo 1: su quale percentuale delle aree considerate dobbiamo mettere PV per coprire il 50% del consumo mediante rinnovabili?

L'obiettivo 1 prevede la produzione di almeno il 50% del Consumo Totale in Toscana di energia elettrica mediante rinnovabili. Considerando che attualmente le statistiche riportano una produzione da rinnovabili compresa fra il 38% ed il 42% del consumo totale, gli ettari necessari e le percentuali in proporzione per gli scenari 1 e 2 sono le seguenti (tabella 9):

Tabella 9: Risultati di sintesi per la valutazione delle aree necessarie per il potential upscaling di PV rispetto all'Obiettivo 1

	38% già in essere (GWh/anno)	42% già in essere (GWh/anno)
OBIETTIVO 50% FABBISOGNO REGIONALE MEDIANTE RINNOVABILI	2.433,84	1609
AREA NECESSARIA (Ha)	1.250,26	826,54
PROPORZIONE SCENARIO 1 (%)	6,67	4,41
PROPORZIONE SCENARIO 2 (%)	43,86	28,99

Figura 9: Grafico dei risultati per Scenari 1 et 2 rispetto a Obiettivo 1



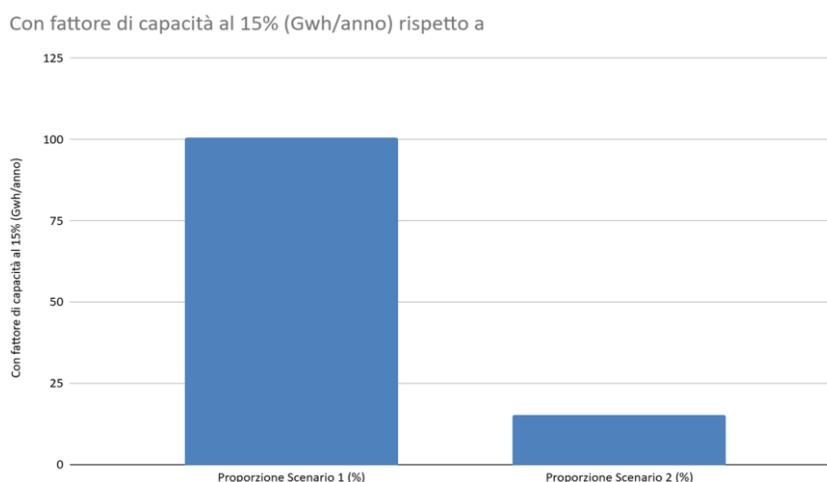
Obiettivo 2: Su quale percentuale delle aree considerate dobbiamo implementare PV per raggiungere l'Obiettivo Ufficiale al 2030?

L'ipotizzato Obiettivo 2 è quello definito nel Decreto Ministeriale 21/06/2024 per il 2030. Questo prevede che la Toscana deve implementare la sua capacità produttiva entro tale data di ulteriori ~4,25 GW mediante rinnovabili. In questo caso si considera un capacity factor tra il 14 ed il 16%. Gli ettari necessari e le percentuali in proporzione per gli scenari 1 e 2 sono le seguenti (tabella 10):

Tabella 10: Risultati di sintesi per la valutazione delle aree necessarie per il potential upscaling di PV rispetto all'Obiettivo 2

	Con fattore di capacità al 15% (GWh/anno)
OBIETTIVO 2030 (DM 21/06/2024): 4.25 GW	5.584,50
AREA NECESSARIA (Ha)	2.868,75
PROPORZIONE SCENARIO 1 (%)	100,63
PROPORZIONE SCENARIO 2 (%)	15,31

Figura 10: Grafico dei risultati per Scenari 1 et 2 rispetto a Obiettivo 2



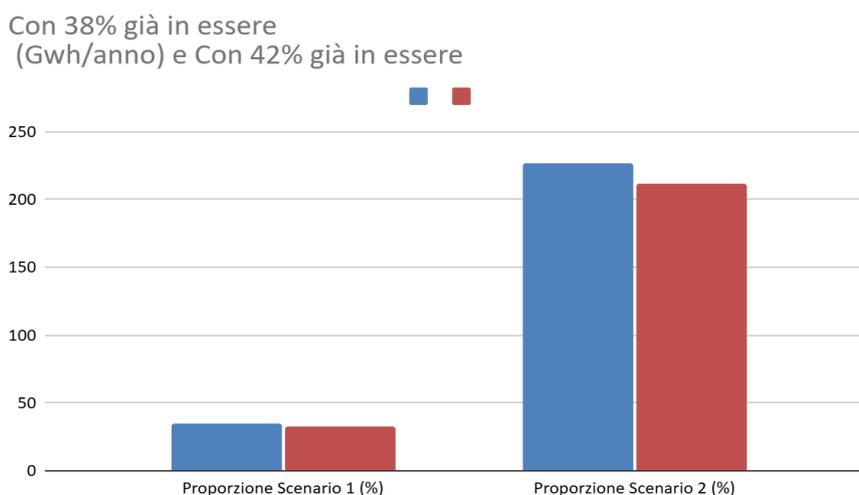
Obiettivo 3: Su quale percentuale delle aree considerate dobbiamo metter PV per raggiungere la Carbon Neutrality al 2050?

Per il raggiungimento dell'Obiettivo 3, ovvero la *Carbon Neutrality* al 2050 si considera la domanda energetica come statica, e si differenzia in funzione del fatto che si consideri attualmente prodotto mediante rinnovabili il 38 o il 42 % del consumo corrente. Gli ettari necessari e le percentuali in proporzione per gli scenari 1 e 2 sono le seguenti (tabella 11):

Tabella 11: Risultati di sintesi per la valutazione delle aree necessarie per il potential upscaling di PV rispetto all'Obiettivo 3

	Con 38% già in essere (GWh/anno)	Con 42% già in essere (GWh/anno)
OBIETTIVO 2050 CARBON NEUTRALITY	12.574,80	11.750,00
AREA NECESSARIA (HA)	6.459,68	6.035,96
PROPORZIONE SCENARIO 1 (%)	34,48	32,22
PROPORZIONE SCENARIO 2 (%)	226,59	211,72

Figura 11: Grafico dei risultati per scenari 1 e 2 rispetto a Obiettivo 3



6.2 Discussione

La proporzione delle aree altamente idonee che rispettano il buffer di 500m da aree a vincolo paesaggistico (2851 ettari) rispetto alle aree totali ritirate (18.734 ettari) è di circa il 15,2%. L'applicazione del buffer riduce significativamente le superfici disponibili per impianti fotovoltaici ad alta idoneità, limitando l'accesso a una parte minore delle aree complessive ritirate. Le aree ritirate dalla produzione rappresentano una risorsa importante per lo sviluppo del fotovoltaico, riducendo i conflitti con l'agricoltura attiva. La sovrapposizione delle aree ritirate con vincoli paesaggistici limita le superfici idonee; una revisione delle normative potrebbe ampliare le opportunità.

- Obiettivo 1: Le aree ritirate con elevata *suitability* (scenario 1) possono contribuire significativamente a coprire l'obiettivo posto al 50% della domanda, tuttavia per massimizzare il contributo delle aree idonee, potrebbe essere utile una revisione dei vincoli paesaggistici, considerando le caratteristiche delle zone incluse nel buffer. Anche con un buffer molto restrittivo come quello del caso studio (500 m, scenario 2), le aree selezionate risultano comunque sufficienti.
- Obiettivo 2: In questo caso, benché le aree ritirate dalla produzione agricola se considerate nel loro complesso sono sufficienti a soddisfare il target definito (scenario 1), quando consideriamo un buffer di 500 m dalle aree soggette a vincolo (che è fissato ad una quota molto inferiore rispetto al massimo possibile previsto dal Decreto "Aree Idonee", cioè 7 km) queste diventano insufficienti (scenario 2), fattore che ancor maggiormente pone l'attenzione di come le aree ritirate possano essere importanti, ma una calibrazione differente dei fattori di policy può causare una maggiore o minore pressione su altri usi agricoli.

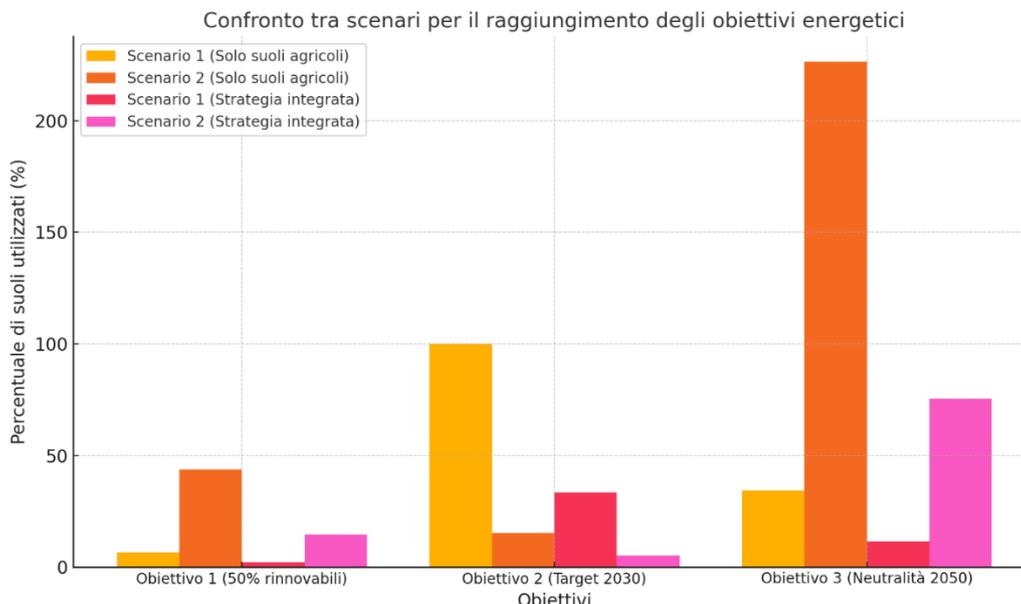
- Obiettivo 3: In questo caso serve circa un terzo del totale delle aree ritirate con elevato indice di *suitability* (scenario 1) per soddisfare l'obiettivo di *carbon neutrality* per il 2050. Al contrario, se si considerano solo quelle oltre un buffer di 500 m dalle aree sotto vincolo (scenario 2), l'obiettivo non sarebbe raggiungibile in quanto servirebbero il doppio dei terreni. Sebbene l'obiettivo sia ambizioso, è utile sottolineare come sia comunque possibile raggiungerlo anche senza alcuno spiazzamento di altri usi del suolo, visto che ipoteticamente le aree ritirate (scenario 1) sono sufficienti al suo soddisfacimento. Tuttavia, molto probabilmente, dovendo considerare una qualche misura di tolleranza rispetto alle aree soggette a vincolo, al fine di non esercitare una pressione antropica eccessiva, sarà necessario anche stabilire l'idoneità di altri usi del suolo.

A questo punto, si rende necessaria una ulteriore riflessione. Un approccio strategico alla pianificazione energetica deve tenere conto del contributo complementare delle diverse funzioni territoriali per evitare conflitti inutili con l'uso del suolo e massimizzare il potenziale delle diverse categorie di superfici. Concentrarsi esclusivamente sui terreni agricoli, anche ritirati dalla produzione, rischia di limitare la flessibilità e l'accettabilità sociale della transizione energetica.

Una strategia più equilibrata e realistica implica una distribuzione del contributo energetico tra aree agricole, aree urbane (tetti di edifici residenziali e commerciali), e aree industriali (tetti di capannoni e infrastrutture). Questa ripartizione consente di diversificare le fonti di produzione energetica, minimizzando l'impatto su ciascuna funzione e garantendo una transizione sostenibile. Una ri-scalatura degli obiettivi risulta quindi necessaria per una analisi in questa prospettiva, che differenzi l'esercizio analitico fra una condizione in cui scenari e obiettivi si presuppone vengano raggiunti solamente mediante i terreni agricoli ritirati dalla produzione, ed una situazione maggiormente realistica che veda anche il contributo dei comparti urbano e industriale. Redistribuendo gli obiettivi tra le funzioni territoriali, ipotizzando che le aree agricole contribuiscano a un terzo del totale richiesto, i risultati si modificano significativamente rispetto all'analisi originale. Di seguito i nuovi valori:

- Obiettivo 1 - 50% del consumo regionale da rinnovabili:
 - Uso esclusivo dei suoli agricoli: lo Scenario 1 richiede il 6,67% delle aree ritirate, mentre lo Scenario 2 ne richiede il 43,86%.
 - Strategia integrata: Lo Scenario 1 richiede il 2,22% e lo Scenario 2 il 14,62% delle aree ritirate. La pressione sulle aree agricole si riduce sensibilmente, rendendo il contributo più gestibile.
- Obiettivo 2 - Target 2030 (4,25 GW):
 - Uso esclusivo dei suoli agricoli: lo Scenario 1 richiede il 100% delle aree ritirate, mentre lo Scenario 2 il 15,31%.
 - Strategia integrata: Lo Scenario 1 richiede il 33,33% e lo Scenario 2 il 5,10% delle aree ritirate. Questa redistribuzione permette di raggiungere il target senza compromettere interamente le aree agricole ritirate.
- Obiettivo 3 - Neutralità Carbonica 2050:
 - Uso esclusivo dei suoli agricoli: lo Scenario 1 richiede il 34,48% delle aree ritirate, mentre lo Scenario 2 ne richiede il 226,59%, rendendo quest'ultimo scenario impraticabile.
 - Strategia integrata: Lo Scenario 1 richiede l'11,49% delle aree ritirate, mentre lo Scenario 2 il 75,53%, valori più sostenibili ma che richiedono comunque un uso più attento delle aree disponibili.

Figura 12: Confronto dei risultati inerenti una strategia integrata rispetto all'uso esclusivo dei suoli agricoli per gli Scenari 1 et 2 rispetto ai 3 obiettivi



Le differenze tra un approccio che si concentra esclusivamente sull'utilizzo dei suoli agricoli e una strategia integrata sono significative e implicano impatti differenti sulla sostenibilità territoriale e sulla possibilità di raggiungere gli obiettivi energetici. L'utilizzo esclusivo dei suoli agricoli si focalizza su una sola tipologia di superficie, determinando un impatto rilevante sulle aree rurali. Questo approccio può generare conflitti sia con l'agricoltura attiva sia con la tutela del paesaggio. Lo Scenario 2, che prevede anche l'applicazione di vincoli paesaggistici, diventa rapidamente insostenibile: la limitazione delle superfici disponibili aumenta la pressione sulle poche aree rimanenti, rendendo più complessa la pianificazione energetica. Inoltre, tale strategia non tiene conto del potenziale offerto da altre funzioni territoriali, come le superfici urbane o industriali, che potrebbero contribuire in modo significativo con un impatto minore.

Al contrario, una strategia integrata distribuisce il carico tra diverse funzioni territoriali, alleggerendo la pressione su ciascuna categoria e permettendo una pianificazione più equilibrata. Questo approccio riduce la percentuale di aree agricole necessarie per il raggiungimento degli obiettivi energetici, salvaguardando le superfici più pregiate e minimizzando i conflitti con la produzione alimentare. Inoltre, valorizza superfici spesso sottoutilizzate, come tetti di edifici urbani e industriali, che presentano un impatto ambientale e paesaggistico quasi nullo.

La strategia integrata presenta numerosi vantaggi rispetto all'uso esclusivo dei suoli agricoli. Innanzitutto, riducendo la pressione sulle aree agricole, migliora l'accettabilità sociale dei progetti energetici, tutelando al contempo il valore del paesaggio e delle colture. In secondo luogo, la diversificazione del contributo tra aree urbane, industriali e agricole rende il sistema più resiliente e meno dipendente da una sola tipologia di suolo. Inoltre, l'adozione di tecnologie innovative come l'agrovoltaico può permettere una gestione multifunzionale delle aree rurali, combinando la produzione agricola ed energetica in modo efficiente. Infine, ripartendo il carico tra diverse categorie territoriali, aumenta la probabilità di raggiungere gli obiettivi energetici, anche in presenza di vincoli normativi e paesaggistici stringenti.

In sintesi, mentre l'uso esclusivo dei suoli agricoli comporta rischi significativi per l'equilibrio territoriale e sociale, la strategia integrata offre una soluzione più sostenibile e inclusiva, capace di bilanciare le esigenze della transizione energetica con la tutela del territorio e delle comunità locali.

6.3 Analisi per provincia

La seguente tabella 12 rappresenta una valutazione quantitativa degli ettari disponibili per la destinazione a pannelli fotovoltaici in Toscana secondo i due scenari. I dati evidenziano differenze significative tra i due scenari proposti in 6.1, legate principalmente all'esclusione delle aree entro un buffer di 500 metri dalle zone sotto vincolo paesaggistico nello Scenario 2.

Tabella 12.

PROVINCIA	SCENARIO 1 (Ha)	PROPORZIONE SC1 REGIONALE (%)	SCENARIO 2 (Ha)	PROPORZIONE SC2 REGIONALE (%)
MASSA CARRARA	0,00	0,00	0,00	0,00
PRATO	64,68	0,35	15,59	0,55
PISA	2.608,25	13,92	399,87	14,03
SIENA	3.930,34	20,98	309,85	10,87
LUCCA	548,33	2,93	156,37	5,48
AREZZO	2.279,22	12,17	464,57	16,30
FIRENZE	2.688,77	14,35	204,35	7,17
PISTOIA	560,29	2,99	247,58	8,68
GROSSETO	4.813,62	25,69	601,97	21,12
LIVORNO	1.240,60	6,62	450,74	15,81
TOTALE	18.734,10	100,00	2.850,89	100,00

Massa Carrara: Non presenta superfici disponibili in entrambi gli scenari, segnalando probabilmente una scarsa estensione di aree agricole dismesse o un elevato impatto delle aree con vincoli paesaggistici.

Prato: La riduzione è marcata, passando da 64,68 ha a soli 15,59 ha (una diminuzione del 76%). Questo suggerisce che la maggior parte delle aree agricole dismesse in provincia sia prossima a zone con vincoli paesaggistici. Tra l'altro sul territorio della provincia di Prato non risultano attualmente richieste di installazione di grandi impianti fotovoltaici. Da rimarcare la forte frammentazione della proprietà dei terreni agricoli nella provincia, che può essere una delle cause di mancate progettualità di impianti fotovoltaici nella zona.

Grosseto: Pur subendo una riduzione significativa, da 4.813,62 ha a 601,97 ha (circa -87%), continua a rappresentare una delle province con il maggior potenziale nello Scenario 2, grazie alla sua ampia disponibilità di terreni.

Siena e Firenze: Subiscono forti riduzioni (~ 92% per entrambe), probabilmente a causa della presenza di vaste aree di pregio paesaggistico.

7. LA SCELTA DELL'AGRIVOLTAICO IN TOSCANA

Un aspetto cruciale da considerare nella pianificazione energetica è la scelta tra l'implementazione del fotovoltaico classico e l'agrivoltaico, un tema di particolare rilevanza in Toscana. Si parla di agrivoltaico semplice se ci sono pannelli posati in filari a terra permettendo di coltivare tra un filare e l'altro; e di agrivoltaico avanzato se i pannelli sono elevati da terra (perché posati su una rete di pali infissi nel terreno) ad altezza da permettere di coltivare il fondo sottostante.

Attualmente, l'evoluzione normativa si muove verso il divieto del fotovoltaico a terra nelle aree agricole, promuovendo esclusivamente l'agrivoltaico. Questa decisione si fonda sulla volontà di preservare l'uso agricolo delle superfici e minimizzare i conflitti con la produzione alimentare e il paesaggio rurale. È in corso l'iter autorizzativo di questi impianti agrivoltaici con potenza superiore a 25 MW in Toscana (fonte: Ministero dell'Ambiente):

Opera: Progetto di un impianto agrivoltaico denominato "GREPPO"

Proponente: Acciona Energia Global Italia S.r.l.

Progetto: Progetto di un impianto agrivoltaico denominato "Greppo", di potenza pari a 26,60 MWp e delle relative opere di connessione alla RTN, da realizzarsi nei comuni di Montepulciano (SI) e Cortona (AR).

Comuni: Montepulciano (SI), Cortona (AR)

Stato: Approvato, non installato

Opera: Progetto di un impianto agrivoltaico sito nel comune di Grosseto in Località "Braccagni", di potenza nominale pari a 38,47 MWp in DC.

Proponente: Grosseto Green Power S.r.l.

Progetto: Progetto di un impianto agrivoltaico sito nel comune di Grosseto in Località "Braccagni", di potenza nominale pari a 38,47 MWp in DC.

Province: Grosseto

Stato: Approvato, non installato

Opera: Agrivoltaico di Monsummano da realizzarsi in Comune di Monsummano Terme (PT)

Proponente: RNE6 S.r.l.

Progetto: Impianto Solare Agrivoltaico di Monsummano da realizzarsi in Comune di Monsummano Terme (PT) di potenza pari a 59 MWp

Comuni: Monsummano Terme (PT)

Aree marine: Nessuna area marina

Stato: Approvato, non installato

Sempre nel grossetano, in Maremma, la Regione Toscana ha espresso a inizio dicembre 2024 parere negativo al progetto di un maxi-impianto agrivoltaico promosso da Ermes spa a Orbetello. Il progetto, per una potenza totale di 17,4 MW, è stato giudicato non idoneo per diverse ragioni. L'area ricade in zone classificate come "Aree Dop-Igp" e in parte in aree di coni visivi e panoramici storicizzati. È vicina ad alcune aree protette, aumentando i rischi per paesaggio, flora, fauna e biodiversità. La Regione ha evidenziato carenze nella valutazione di impatto ambientale, con particolare riferimento al paesaggio e alla biodiversità. Anche la Soprintendenza per Siena, Grosseto e Arezzo si è opposta al progetto. Nonostante il parere negativo della Regione (espresso il 25 novembre 2023), l'autorità statale ha l'ultima parola, poiché il parere regionale è solo consultivo. Il progetto resta in discussione presso il Ministero

dell'Ambiente. Questo evidenzia che anche gli impianti agrivoltaici non sono esenti dai vincoli paesaggistici, benché sia preservata la possibilità di utilizzo del suolo a fini agricoli.

Le analisi presentate in questo report evidenziano come il fotovoltaico classico, se concentrato esclusivamente su aree agricole ritirate dalla produzione, potrebbe contribuire in modo significativo al raggiungimento degli obiettivi energetici senza intaccare gli usi agricoli produttivi. Queste aree rappresentano una risorsa già inutilizzata per l'agricoltura e, pertanto, possono essere trasformate in una risorsa strategica per la transizione energetica, riducendo la necessità di interferire con le attività agricole attive. In questo contesto, limitarsi all'agrivoltaico potrebbe risultare controproducente, precludendo opportunità di sfruttamento sostenibile delle superfici ritirate.

La scelta tra agrivoltaico e fotovoltaico classico non può essere generalizzata, ma richiede una valutazione approfondita e calibrata. È necessario distinguere tra diverse tipologie di superfici agricole e considerare il contesto territoriale, economico e produttivo in cui esse si inseriscono. Le aree ritirate dalla produzione, ad esempio, potrebbero essere destinate prioritariamente al fotovoltaico classico, che garantisce una maggiore efficienza energetica per unità di superficie e un più rapido avanzamento verso gli obiettivi regionali. L'agrivoltaico, invece, potrebbe essere riservato a superfici ancora produttive, ove la coesistenza tra energia e agricoltura può apportare benefici multifunzionali.

Per evitare conflitti tra obiettivi energetici e agricoli, una strategia integrata potrebbe portare a risultati più equilibrati. Tale approccio dovrebbe prevedere:

- Fotovoltaico classico concentrato esclusivamente sulle aree agricole ritirate dalla produzione, massimizzandone l'efficienza energetica senza compromettere l'uso agricolo attivo.
- Agrivoltaico implementato su superfici produttive selezionate, con particolare attenzione alle colture che possono beneficiare di una parziale ombreggiatura, migliorando la resilienza ai cambiamenti climatici.
- Governance territoriale locale, con cabine di regia regionali e provinciali per individuare le aree più idonee per ciascuna tecnologia, sulla base di analisi territoriali e socioeconomiche.

Le aree idonee all'agrivoltaico dovranno essere definite in base alle colture, privilegiando quelle che richiederebbero comunque un ombreggiamento, quali ad esempio la vite e le orticole, sempre più penalizzate dalla crisi climatica che le sottopone ad alte temperature e ad eccessi d'insolazione. L'agrivoltaico, insieme al fotovoltaico sui tetti degli edifici rurali e delle stalle, potrebbe contribuire a integrare il reddito delle imprese agricole toscane, sempre più penalizzate dalla scarsa remunerazione nelle filiere, dal caro/energia e dall'abbandono.

Peraltro, adesso, il "Bando agrivoltaico 2024", finanziato dal PNRR con 1,1 miliardi di euro e basato sul decreto 436/2023 del Ministero dell'Ambiente, offre un'importante opportunità per le aziende agricole italiane interessate a investire in impianti agrivoltaici innovativi. L'obiettivo è incentivare l'installazione di impianti di piccola e media taglia, più adatti al contesto agricolo nazionale. I benefici includono: Contributi a fondo perduto fino al 40% dei costi ammissibili; tariffe incentivanti per l'energia immessa in rete.

La scelta di soluzioni agrivoltaiche deve comunque tenere conto di più fattori. Il più importante è quello del tipo di coltivazione che si vuole sviluppare sotto i pannelli. Le linee Guida del Ministero dell'Ambiente classificano le colture agricole in base alla loro reazione all'ombreggiatura causata dagli impianti agrivoltaici:

- Molto adatte: colture che beneficiano dell'ombreggiatura, migliorando le rese (es. fave, insalata, patate, spinaci, luppolo).

- Adatte: colture con rese quasi inalterate da un'ombreggiatura moderata (es. asparagi, carote, orzo, piselli, ravanelli, segale).
- Mediamente adatte: colture che tollerano l'ombreggiatura con effetti moderati sulle rese (es. cipolle, cetrioli, zucchine).
- Poco adatte: colture con rese significativamente ridotte (es. cavolfiori, barbabietole).
- Non adatte: colture ad alto fabbisogno di luce, gravemente penalizzate (es. alberi da frutto, frumento, mais).

Studi evidenziano che gli impianti agrivoltaici possono favorire alcune colture specifiche. Ad esempio, uno studio condotto da CNR, Università di Firenze e REM Tec srl su un impianto agrivoltaico in provincia di Mantova ha analizzato l'effetto dell'ombreggiamento sul frumento (destinato a consumo animale) coltivato sotto un impianto agrivoltaico. L'ombreggiamento ha influenzato le caratteristiche della biomassa del frumento, migliorando la digeribilità per i ruminanti grazie a un aumento di proteine grezze, fibre, e un rapporto calcio-fosforo più favorevole. L'ombreggiamento ha inoltre ridotto l'altezza delle piante e modificato le proprietà nutritive della biomassa, influenzando la qualità del foraggio¹.

La progettazione dell'impianto agrivoltaico deve inoltre tenere delle modalità di gestione del campo, anche per le fasi di manutenzione e raccolta, garantendo spazi ed altezze adeguati.

Dal punto di vista dell'uso del terreno non di proprietà, la giurisprudenza prevede che il diritto di superficie rappresenta una soluzione contrattuale naturale per impianti fotovoltaici a terra, poiché consente di separare la proprietà del suolo da quella delle costruzioni. Tuttavia, la sua applicazione agli impianti agrivoltaici, che combinano produzione di energia e coltivazione agricola, pone complessità nel bilanciamento degli interessi tra produttore di energia e agricoltore.

D'altra parte, l'implementazione esclusiva dell'agrivoltaico potrebbe limitare il potenziale delle aree agricole ritirate, che rappresentano una risorsa preziosa per lo sviluppo del fotovoltaico classico. Al contrario, una strategia integrata che sfrutti le aree ritirate per il fotovoltaico classico e promuova l'agrivoltaico nelle superfici produttive potrebbe massimizzare il contributo delle aree agricole agli obiettivi energetici senza sacrificare la produzione alimentare.

È raccomandabile una revisione delle attuali politiche regionali per includere un approccio più flessibile che bilanci l'adozione del fotovoltaico classico e dell'agrivoltaico. Questo richiede:

- Analisi delle aree ritirate dalla produzione per determinare il loro potenziale energetico e il contributo possibile agli obiettivi regionali.
- Valutazione multifunzionale delle superfici agricole attive, per identificare i contesti in cui l'agrivoltaico può apportare benefici senza interferire con la produttività agricola.
- Incentivi per entrambe le tecnologie, garantendo che la scelta di una soluzione non pregiudichi l'altra e promuovendo una transizione energetica diversificata e sostenibile.

Una pianificazione energetica territoriale ben calibrata, sostenuta da una governance locale efficace, sarà essenziale per bilanciare queste esigenze e garantire una transizione energetica sostenibile e armoniosa.

¹ Dal Prà, A., Miglietta, F., Genesio, L. *et al.* Determination of feed yield and quality parameters of whole crop durum wheat (*Triticum durum Desf.*) biomass under agrivoltaic system. *Agroforest Syst* 98, 2861–2873 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10457-024-00979-8>

8. CONCLUSIONI E IMPLICAZIONI

L'analisi condotta evidenzia chiaramente l'impatto significativo dei vincoli paesaggistici sulla pianificazione e implementazione delle infrastrutture fotovoltaiche in Toscana. Lo **Scenario 2**, che tiene conto di tali vincoli, mostra una drastica riduzione delle superfici disponibili per i pannelli fotovoltaici, pari a circa l'85% rispetto allo Scenario 1. Questo dato sottolinea come la tutela del paesaggio rappresenti un fattore cruciale, influenzando in modo sostanziale la distribuzione territoriale del potenziale energetico rinnovabile. Le province di Grosseto, Arezzo e Pisa emergono come le aree con maggiore potenziale anche nello Scenario 2, sebbene il loro contributo in termini assoluti risulti ridotto. D'altra parte, province con vincoli paesaggistici più stringenti, come Firenze, Siena e Lucca, richiedono un approccio equilibrato che combini la protezione del paesaggio con l'esigenza di sviluppare energie rinnovabili. Per le aree completamente escluse, come Massa Carrara, sarà necessario definire strategie alternative, come la promozione di tecnologie fotovoltaiche innovative o la conversione di altre tipologie di superfici.

Sulle base delle osservazioni discusse sin qui è possibile avanzare ragionevolmente alcune conclusioni e raccomandazioni operative. La definizione del buffer nelle aree destinate all'installazione di impianti fotovoltaici rappresenta un elemento cruciale per il raggiungimento degli obiettivi energetici regionali e nazionali. I dati emersi dall'analisi evidenziano come l'applicazione di un buffer uniforme sul territorio generi una disomogeneità significativa tra le province. Questa disparità risulta particolarmente evidente nel confronto tra lo Scenario 1, che considera tutte le aree agricole ritirate, e lo Scenario 2, che applica un buffer di 500 metri dalle aree soggette a vincolo paesaggistico. Province come Grosseto e Pisa mantengono un contributo rilevante nello Scenario 2, mentre altre, come Massa Carrara e Prato, vedono il loro potenziale praticamente annullato. Questa disomogeneità è il risultato di un'applicazione indifferenziata del buffer, che non tiene conto della tipologia di vincolo paesaggistico né del contesto territoriale in cui queste aree sono inserite. Un approccio uniforme non considera, ad esempio, che alcune aree marginali potrebbero avere un impatto paesaggistico minore rispetto a siti agricoli di pregio o a paesaggi storici. Ciò porta non solo a uno squilibrio provinciale nella distribuzione del potenziale fotovoltaico, ma rischia anche di compromettere l'efficienza e l'equità nella pianificazione energetica regionale.

Si evince quindi la necessità di un approccio *place-based* nella definizione del buffer, per garantire un equilibrio territoriale e un contributo più omogeneo tra le province. Questo implicherebbe calibrare i vincoli territoriali in base alle caratteristiche specifiche delle aree, includendo aspetti come la rilevanza paesaggistica, il valore agricolo e il contesto socioeconomico. Un buffer personalizzato consentirebbe di proteggere adeguatamente i siti sensibili, senza penalizzare inutilmente le superfici potenzialmente disponibili per l'installazione di impianti fotovoltaici. Questo modello di governance garantirebbe una maggiore flessibilità nella pianificazione e consentirebbe di trovare un equilibrio ottimale tra protezione del paesaggio e sviluppo delle energie rinnovabili.

In un quadro normativo e giurisprudenziale in costante evoluzione, va sottolineato che durante l'elaborazione del report il Consiglio di Stato, con l'ordinanza n. 4298 del 14 novembre 2024, ha parzialmente sospeso il Decreto Ministeriale "Aree Idonee", limitatamente all'art. 7, comma 2, lettera c), che consente alle Regioni di ridefinire le aree idonee per l'installazione di impianti da fonti rinnovabili. La sospensione temporanea mira a evitare che le Regioni adottino disposizioni legislative restrittive prima della decisione di merito, prevista per il 5 febbraio 2025, mantenendo comunque il DM in vigore nelle altre sue parti. Sempre il Consiglio di Stato, con la sentenza n. 7780/2024, ha accolto il ricorso di una società per la realizzazione di un impianto fotovoltaico da 999 kW in Puglia, annullando il diniego del Comune. Il terreno era stato infatti classificato come "area idonea", ma l'amministrazione aveva rifiutato l'autorizzazione per vincoli paesaggistici. La decisione del Consiglio di Stato ha evidenziato l'amministrazione doveva valutare anche la visibilità ridotta dell'impianto e l'interesse

pubblico verso le energie rinnovabili. La sentenza, dunque, ha sottolineato la necessità di bilanciare tutela paesaggistica e sviluppo sostenibile, ribadendo che i vincoli non devono ostacolare arbitrariamente impianti conformi alla normativa.

Sulla base delle evidenze emerse e della normativa vigente, si considera auspicabile ove possibile:

- Rivedere l'approccio alla definizione del buffer, passando da una logica uniforme a una *place-based*, calibrata sulle specificità territoriali.
- Istituire cabine di regia locali per guidare il processo decisionale e garantire una pianificazione territoriale integrata e condivisa, non pregiudicando comunque lo sviluppo delle energie rinnovabili.
- Incentivare studi di dettaglio locali, che permettano di identificare con maggiore precisione le aree idonee, minimizzando l'impatto su aree agricole di pregio e siti paesaggisticamente rilevanti.
- Monitorare gli effetti delle decisioni, attraverso una valutazione periodica delle superfici realmente utilizzate e dei risultati in termini di capacità fotovoltaica installata.

Queste misure consentono potenzialmente non solo di raggiungere gli obiettivi energetici prefissati, ma anche di farlo in modo equo, sostenibile e rispettoso delle peculiarità territoriali. L'energia solare, se opportunamente pianificata, può rappresentare una straordinaria opportunità di sviluppo, contribuendo alla transizione energetica senza sacrificare il patrimonio paesaggistico e agricolo che caratterizza la regione.

In sintesi, la pianificazione regionale deve orientarsi verso un modello di bilanciamento e sostenibilità, sfruttando le aree dismesse o marginali per la produzione di energia fotovoltaica, e promuovendo il dialogo con le comunità locali per garantire un'armoniosa integrazione degli impianti nel contesto paesaggistico. Questo approccio consentirà di avanzare nella transizione energetica senza compromettere il patrimonio ambientale e culturale che contraddistingue il territorio toscano.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Breiman, L. Random Forests. *Machine Learning* 45, 5–32 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Bollettino Ufficiale della Regione Toscana - n. 40, Mozione n. 1763 approvata nella seduta del Consiglio regionale del 17 settembre 2024.
- Consiglio di Stato, sez. IV, ordinanza n. 4298 del 14.11.2024
- Cutler, A., Cutler, D.R., Stevens, J.R. (2012). Random Forests. In: Zhang, C., Ma, Y. (eds) *Ensemble Machine Learning*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9326-7_5
- Dal Prà, A., Miglietta, F., Genesio, L. et al. Determination of feed yield and quality parameters of whole crop durum wheat (*Triticum durum* Desf.) biomass under agrivoltaic system. *Agroforest Syst* 98, 2861–2873 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10457-024-00979-8>
- Decreto Legislativo 8 novembre 2021, n. 199
- Decreto Ministeriale 21 giugno 2024
- Decreto Legge 15 maggio 2024, n. 63
- Fawagreh, K., Gaber, M. M., & Elyan, E. (2014). Random forests: from early developments to recent advancements. *Systems Science & Control Engineering*, 2(1), 602–609. <https://doi.org/10.1080/21642583.2014.956265>
- Kruitwagen, L., Story, K.T., Friedrich, J. et al. A global inventory of photovoltaic solar energy generating units. *Nature* 598, 604–610 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03957-7>
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, Linee Guida in materia di Impianti Agrivoltaici (2022). <https://www.mase.gov.it/notizie/impianti-agri-voltaici-pubblicate-le-linee-guida>