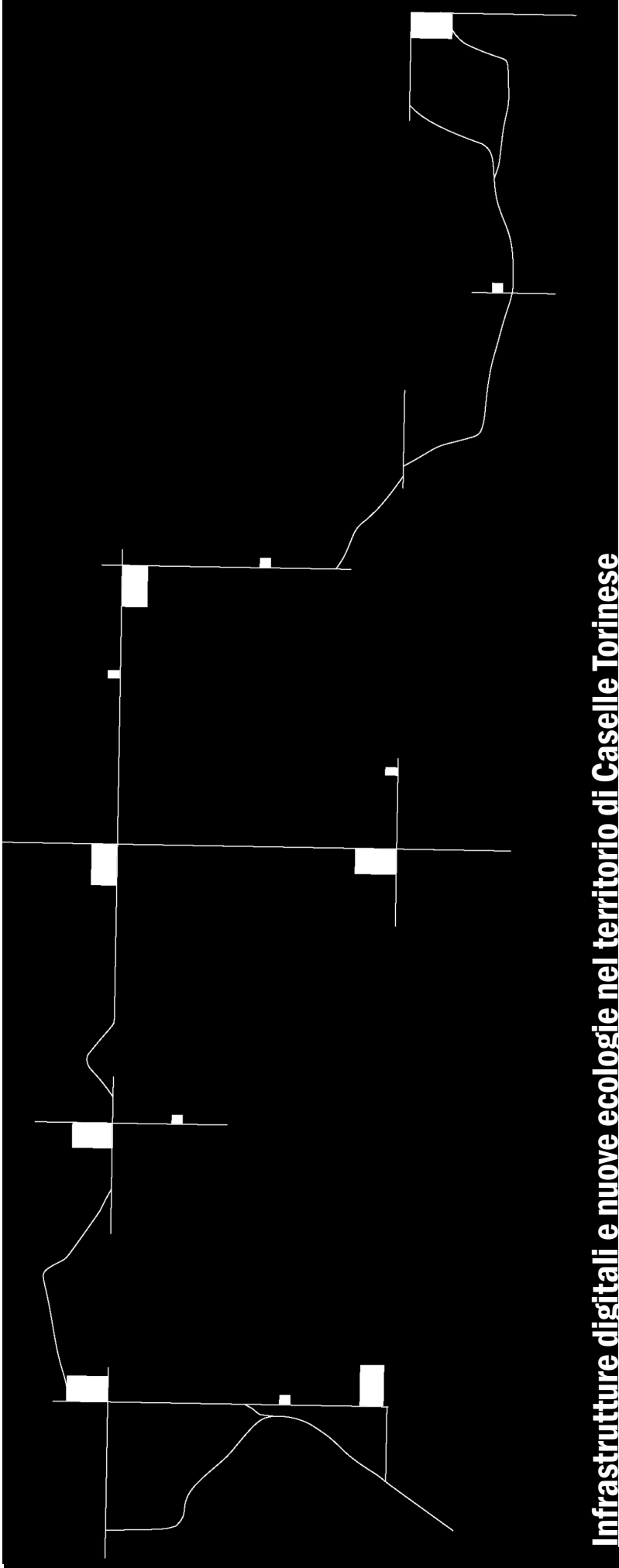


Infrastrutture digitali e nuove ecologie nel territorio di Caselle Torinese

Dall'

Intelligenza Artificiale

all'

Agricoltura Intelligente

POLITECNICO DI TORINO E UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO
Dipartimento di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio
Laurea Magistrale in Architettura del Paesaggio
A.A. 2025/2026

Dall'Intelligenza Artificiale all'Agricoltura Intelligente.
Infrastrutture digitali e nuove ecologie nel territorio di Caselle Torinese.

Relatore
Prof. Gianni Lobosco

Correlatori
Dott. Ing. Fabio Bruzzone
Prof. Ing. Carlo Rosso

Studente
Federica Favaro

INDICE

abstract

intro

1. RIVOLUZIONE DIGITALE: LA NASCITA DEI DATA CENTER

1.1 DALL'ERA ANALOGICA A QUELLA DIGITALE

1.2 IL PESO INVISIBILE DEI DATI

1.3 LE FABBRICHE DELL'ERA DIGITALE
- 1.3.1 Struttura
- 1.3.2 Funzionamento

2. IMPRONTA AMBIENTALE

2.1 IL CONSUMO ENERGETICO

2.2 IL *CLOUD* DI CO_2

2.3 L'IMPRONTA IDRICA

2.4 L'ISOLA DI CALORE

2.5 IL RUMORE DEL DATO

3. INDIPENDENZA ENERGETICA

3.1 L'ERA RINNOVABILE

3.2 OLTRE LE FONTI RINNOVABILI: STRATEGIE INVISIBILI
- 3.2.1 Free-cooling
- 3.2.2 Waste heat recovery
  - 3.2.2.1 Temperatura del calore di scarto: il ruolo del sistema di raffreddamento
  - 3.2.2.2 Applicazioni: dal riscaldamento urbano all'agricoltura

3.3 IL CALORE DI SCARTO IN AGRICOLTURA
- 3.3.1 Essiccazione dei cereali
- 3.3.2 Vertical hydroponic farming

4. CASELLE TORINESE E IL SUO INTORNO

4.1 DALLE CENTURIE ALLE INFRASTRUTTURE

4.2 L'ESISTENTE
- 4.2.1 Lo sguardo d'insieme
  - 4.2.1.1 Insediamento antropico
  - 4.2.1.2 Geomorfologia e idrografia
- 4.2.2 Lo sguardo ravvicinato
  - 4.2.2.1 Insediamento e infrastrutture
  - 4.2.2.2 Tipologia edificato
  - 4.2.2.3 Piano Regolatore Generale
  - 4.2.2.4 Idrografia
  - 4.2.2.5 Suolo
  - 4.2.2.6 Permeabilità e impermeabilità
  - 4.2.2.7 Vegetazione
  - 4.2.2.8 Uso del suolo agricolo

4.3 I LIMITI AEROPORTUALI
- 4.3.1 Bird strike
- 4.3.2 Il rumore esistente: l'aeroporto

4.4 QUANTO PESA UN DATO?
- 4.4.1 Consumo energetico
- 4.4.2 Emissioni di CO_2
- 4.4.3 Consumo idrico
- 4.4.4 Calore generato
- 4.4.5 Il rumore aggiunto: il data center

4.5 LA MISURA DEL VISIBILE
- 4.5.1 Energia solare
- 4.5.2 Energia eolica
- 4.5.3 Energia idroelettrica
- 4.5.4 Energia piezoelettrica

4.6 LA MISURA DELL'INVISIBILE
- 4.6.1 Free-cooling: il freddo come risorsa
- 4.6.2 Waste heat reuse: il calore come risorsa
  - 4.6.2.1 Agire sul presente: Essiccazione dei cereali
  - 4.6.2.2 Agire sul futuro: Vertical hydroponic farming

5. CONVIVERE: NUOVE ECOLOGIE TERRITORIALI

5.1 LA STRATEGIA

5.2 IL MASTERPLAN

5.3 LE SCELTE VEGETAZIONALI: OLTRE IL LIMITE AEROPORTUALE

5.4 GLI APPROFONDIMENTI
- 5.4.1 La mitigazione del rumore
- 5.4.2 Il sistema di parchi sub-urbani
- 5.4.3 Il parco produttivo

6. GLI SCENARI POSSIBILI

6.1 SOTTRARRE

6.2 RESISTERE

6.3 SFRUTTARE

6.4 CONVIVERE

conclusioni

bibliografia

sitografia

La rapida diffusione del digitale sta trasformando i data center in infrastrutture territoriali sempre più rilevanti per l'entità dei loro fabbisogni energetici e idrici, per la produzione di calore residuo e per gli effetti ambientali associati al loro funzionamento. Il dato, infatti, non è un'entità immateriale e priva di peso: la sua produzione, elaborazione e conservazione richiedono spazi, risorse e infrastrutture, generando conseguenze concrete sui territori che le ospitano. Il progetto di un nuovo data center a Caselle Torinese, nelle immediate vicinanze dell'Aeroporto di Torino e all'interno di un territorio ancora fortemente caratterizzato dalla produzione agricola, rende particolarmente evidente questa condizione.
La tesi assume tali impatti non come elementi interamente eliminabili attraverso il progetto di paesaggio, ma come condizioni a partire dalle quali interrogare le possibili trasformazioni del territorio. Una prima fase della ricerca verifica la possibilità di soddisfare localmente il fabbisogno energetico del data center attraverso fonti rinnovabili, evidenziando l'insufficienza delle risorse disponibili rispetto alla scala dei consumi previsti. Da questa constatazione, l'indagine si sposta dalla ricerca di un'improbabile autosufficienza dell'infrastruttura alla possibilità di intervenire sui suoi metabolismi, approfondendo in particolare il free cooling, il recupero del calore di scarto e le possibili relazioni con sistemi agricoli capaci di ottimizzare l'impiego delle risorse, comprese quelle idriche.
Parallelamente, l'analisi cartografica e storica del territorio mette in relazione la nuova infrastruttura digitale con quella aeroportuale esistente. I vincoli connessi alla sicurezza del volo e, in particolare, al rischio di bird-strike vengono assunti non soltanto come limitazioni, ma come parametri capaci di orientare la configurazione ecologica e spaziale del progetto. La presenza dell'aeroporto contribuisce così a definire le condizioni entro cui immaginare nuove forme di naturalità progettata e controllata, compatibili con le restrizioni imposte dall'infrastruttura e capaci di introdurre nuovi spazi ecologici all'interno di un territorio fortemente antropizzato.
A partire dall'interazione tra queste condizioni, la tesi prefigura un nuovo paesaggio rurale tra i comuni di Caselle Torinese e San Maurizio Canavese: un ambito agricolo produttivo capace di integrare diversi sistemi ecologici e fruitivi che si configurano come veri a propri parchi suburbani. Il calore residuo del data center, anziché essere considerato esclusivamente come uno scarto da dissipare, viene reimpiegato all'interno di nuove filiere agricole, mentre la riorganizzazione dei sistemi produttivi e dei cicli delle risorse definisce un modello di Agricoltura Intelligente fondato sull'integrazione tra infrastruttura digitale, produzione agricola e gestione delle risorse.
Il progetto non propone quindi la neutralizzazione degli impatti del data center, quanto la loro traduzione in nuove relazioni territoriali. La compresenza di infrastrutture digitali e aeroportuali diventa la condizione a partire dalla quale riorganizzare pratiche agricole, cicli energetici e idrici, spazi accessibili alla popolazione e forme di naturalità compatibili con vincoli fortemente artificiali. La ricerca esplora così il ruolo del progetto di paesaggio nella costruzione di nuove ecologie territoriali, capaci di emergere dalle contraddizioni e dalle interdipendenze generate dalle grandi infrastrutture contemporanee.

abstract

intro

Dietro ogni file, ogni ricerca, ogni interazione digitale si nasconde un'infrastruttura digitale che occupa suolo, consuma energia e acqua, produce calore residuo e genera conseguenze concrete sui territori che la ospitano. L'elaborazione e l'archiviazione dei dati richiedono spazi, risorse e infrastrutture concrete, e la rapida diffusione del digitale sta trasformando i data center in infrastrutture territoriali di crescente rilevanza. Questa condizione, spesso invisibile all'utente finale che percepisce il dato come qualcosa di leggero e immateriale, diventa concreta e misurabile nel momento in cui si osserva il territorio chiamato a ospitare fisicamente queste colossali fabbriche digitali.

Il progetto di un nuovo data center a Caselle Torinese, nelle immediate vicinanze dell'Aeroporto di Torino e all'interno di un territorio ancora fortemente caratterizzato dalla produzione agricola, rende particolarmente evidente questa condizione. Qui si sovrappongono e si confrontano tre sistemi profondamente diversi: l'infrastruttura aeroportuale, la realtà agricola e la nuova infrastruttura digitale. Questo territorio, del resto, è già segnato da una storia lunga e stratificata: un paesaggio agricolo che affonda le proprie origini nella centuriazione romana e che, in tempi più recenti, ha visto la nascita dell'Aeroporto. La nuova infrastruttura digitale non si inserisce dunque in un territorio vuoto o neutro, ma in un sistema già complesso, con vincoli, identità storiche e attività agricole ancora vive.

A partire da questo scenario, la tesi si interroga sulla seguente domanda: in che modo il progetto di paesaggio può ridefinire la relazione tra infrastruttura digitale, sistema agricolo e vincoli aeroportuali, trasformando gli impatti ambientali del data center in occasioni di costruzione di nuove ecologie territoriali? La tesi non assume infatti gli impatti ambientali del data center come elementi interamente eliminabili attraverso il progetto di paesaggio, ma come condizioni a partire dalle quali interrogare le possibili relazioni con il territorio.
L'obiettivo della ricerca è duplice: da un lato, indagare i metabolismi energetici e ambientali del data center, quali consumi, dispersioni e calore residuo, passando da una ricerca globale al caso concreto del data center in fase di realizzazione a Caselle Torinese, per comprenderne la reale entità e le possibilità di reimpiego. Dall'altro, tradurre questa comprensione in un progetto di paesaggio capace di mettere in relazione l'infrastruttura digitale, l'attività agricola esistente e i vincoli imposti dalla prossimità aeroportuale. La tesi indaga sulla percezione di questa infrastruttura digitale, non solo come oggetto da mitigare o da nascondere, ma come agente attivo di trasformazione del paesaggio rurale contemporaneo.

Dal punto di vista metodologico, la ricerca si è sviluppata in un primo momento sulla nascita di Internet e su come questo fenomeno, nel corso di pochi anni, si sia intensificato fino ad arrivare, inevitabilmente, alla costruzione di queste enormi fabbriche digitali per contenere tutti i milioni di dati che ogni giorno vengono generati. Successivamente, la ricerca si è basata sulla struttura fisica dei data center e sull'impatto ambientale a scala globale di queste infrastrutture, definendo delle formule che aiutano a quantificare l'impronta ambientale reale. L'indagine si sposta quindi sulla ricerca di possibili soluzioni, attraverso un'analisi comparata di casi studio e letteratura tecnico-scientifica e, successivamente, un'analisi cartografica e una lettura sui vincoli aeroportuali, in modo da costruire una base conoscitiva su cui fondare le scelte progettuali.
Le formule discusse vengono infine applicate al caso di Caselle Torinese, per quantificare i consumi ambientali derivanti dal data center e indagare possibili soluzioni in grado di mitigarne l'impronta, partendo da una verifica delle risorse naturali disponibili per considerare l'introduzione di eventuali energie rinnovabili, ma dimostrando l'insufficienza di queste rispetto alla scala dei consumi previsti. Vengono definite strategie visibili, poiché l'uomo è abituato a un paesaggio illusorio, in cui l'energia scorre silenziosamente sotto terra, senza che se ne percepisca concretamente l'entità del consumo, mentre le energie rinnovabili, con il loro impatto estetico sul paesaggio, comunicano immediatamente il costo ambientale.

L'indagine si sposta quindi sulla possibilità di intervenire sui metabolismi stessi del data center, approfondendo in particolare il free cooling e il recupero del calore di scarto, definiti come strategie invisibili. In particolare viene approfondito il calore di scarto applicato nella produzione agricola. Il data center viene così riletto non solo come consumatore, ma come potenziale produttore di energia termica riutilizzabile.

Attraverso l'analisi storica e cartografica viene dimostrato invece che il paesaggio agricolo di Caselle Torinese fonda le proprie radici già in epoca romana con la centuriazione, per arrivare in tempi più recenti alla costruzione dell'infrastruttura aeroportuale. Anche quest'ultima comporta un impatto ben specifico sul territorio circostante: i vincoli connessi alla sicurezza del volo, e in particolare al rischio di bird strike, vengono assunti non soltanto come limitazioni, ma come parametri capaci di orientare la configurazione ecologica e spaziale del progetto.
A partire dall'interazione tra queste condizioni, ovvero quelle relative all'impatto ambientale e ai suoi consumi e a quelle aeroportuali e storico-identitarie, la tesi prefigura un nuovo paesaggio rurale tra i comuni di Caselle Torinese e San Maurizio Canavese: un ambito agricolo produttivo capace di integrare diversi sistemi ecologici e fruitivi. Il calore residuo del data center, anziché essere considerato esclusivamente uno scarto da dissipare, viene reimpiegato all'interno di nuove filiere agricole.

Il progetto di paesaggio, quindi, ha un ruolo attivo anche di fronte a infrastrutture colossali, sia per dimensione sia per impronta ambientale, non limitandosi a mitigarne gli effetti, ma contribuendo a costruire, a partire dalle loro stesse contraddizioni, nuove ecologie territoriali.

La tesi si articola in sei capitoli. Il primo descrive la nascita di Internet e come questo fenomeno abbia portato alla costruzione dei data center, trattando poi, in un secondo momento, la struttura interna di queste enormi fabbriche digitali. Il secondo, invece, analizza su scala globale i consumi ambientali di queste infrastrutture digitali, considerando i consumi energetici, idrici, le emissioni di CO_2 e il calore generato. Il terzo capitolo indaga possibili soluzioni per mitigare gli effetti di questi consumi, partendo da una prima verifica riguardo alle risorse naturali disponibili sul territorio e dimostrando l'infattibilità delle fonti rinnovabili rispetto all'energia richiesta dal data center. La tesi si sposta quindi sulla ricerca di possibili interventi sui metabolismi stessi del data center, come il free cooling e il recupero del calore di scarto; in particolare, quest'ultimo viene applicato in relazione all'agricoltura. Nel quarto capitolo viene applicata questa ricerca al caso studio del data center in fase di realizzazione a Caselle Torinese, spostandosi da una prima analisi cartografica del territorio fino alla quantificazione dell'impronta ambientale che deriverà da questa infrastruttura digitale. A questo si applicano quindi le strategie invisibili, ovvero il free cooling e il recupero del calore di scarto, che agiscono direttamente sui metabolismi del data center. In particolare, viene applicato il calore di scarto nell'agricoltura, creando una sinergia tra queste due realtà, quella agricola e quella digitale. Nel quinto capitolo viene sviluppata la proposta progettuale, delineando le strategie di integrazione tra data center, filiere agricole e sicurezza aeroportuale. Il sesto e ultimo capitolo, infine, definisce alcuni possibili scenari a seconda delle risposte adottate nei confronti di questa nuova infrastruttura digitale nel territorio di Caselle Torinese: si passa da un territorio arido e praticamente desertico, nel caso in cui non venga presa in considerazione alcuna soluzione, fino alla proposta progettuale in cui, dalla relazione tra realtà agricola, infrastruttura aeroportuale e infrastruttura digitale, vengono definite nuove ecologie territoriali.

1. RIVOLUZIONE DIGITALE: LA NASCITA DEI DATA CENTER

1.1 DALL’ERA ANALOGICA A QUELLA DIGITALE

1.2 IL PESO INVISIBILE DEI DATI

1.3 LE FABBRICHE DELL’ERA DIGITALE



1.1 IBM 7094 al MIT, anni '60. Fotografia di autore ignoto. storiainformatica.it

1.1 DALL'ERA ANALOGICA A QUELLA DIGITALE

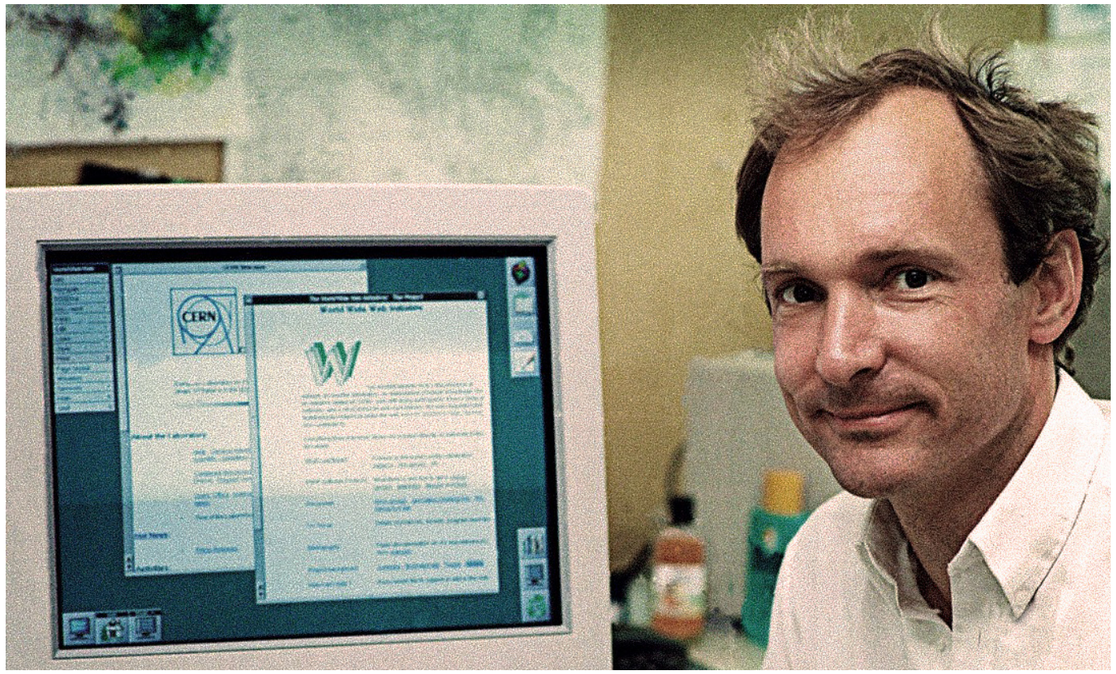
Le invenzioni del telegrafo, del telefono, della radio e del computer hanno segnato l'inizio della **Rivoluzione Digitale**. È tuttavia con la **nascita di Internet** che si è giunti ad una visione unificata di rete globale. Il mondo, dapprima frammentato, in cui ogni persona era percepita come un'entità a sé stante, è mutato verso una nuova realtà interconnessa, in cui ciascuno è attore di una rete globale capace di accorciare ogni distanza (Leiner et al., 2009).

La nascita di Internet si fonda proprio sul concetto primordiale di **''Rete Galattica''**, teorizzato nel 1962 da J.C.R. Licklider, a capo del gruppo di ricerca DARPA, che immaginò una rete globale di computer interconnessi, capace di garantire a ciascun nodo l'accesso ai dati e ai programmi presenti su qualsiasi sito. Quasi parallelamente, nel 1961, Leonard Kleinrock pubblicò il primo articolo sulla commutazione di pacchetto, la tecnica di trasmissione dei dati secondo cui un messaggio viene suddiviso in pacchetti in grado di viaggiare autonomamente all'interno di una rete. Successivamente, nel 1965, Lawrence G. Roberts, anch'egli nel gruppo di ricerca DARPA, in collaborazione con Thomas Merrill connesse il computer TX-2 in Massachusetts al Q-32 in California, tramite una linea telefonica dedicata a commutazione di circuito, caratterizzata da un unico canale riservato tra due nodi, dando vita alla prima rete di computer mai esista. Questo esperimento rivelò tuttavia che il sistema telefonico a commutazione di circuito era inadeguato a tale scopo, confermando così la validità della teoria di Kleinrock sulla commutazione di pacchetto (Leiner et al., 2009).

Nel 1967 Roberts pubblicò il piano per **ARPANET**, la prima rete a pacchetto finanziata dal gruppo ricerca DARPA e, due anni dopo, venne stabilita la prima connessione di rete tra UCLA e Stanford (Leiner et al., 2009).

A questo punto DARPA si dedicò allo sviluppo di uno dei componenti chiave per la commutazione di pacchetto, ovvero gli Interface Message Processor (IMP), router in grado di collegare i singoli computer alla rete ARPANET (Leiner et al., 2009). Nel 1972, Ray Tomlinson introdusse la posta elettronica, un software di base che permetteva l'invio e la ricezione di messaggi. L'e-mail divenne l'applicazione di rete principale per oltre un decennio e ha costituito le fondamenta di quella che, ancora oggi, resta una delle attività per cui Internet viene maggiormente utilizzato (Leiner et al., 2009).

Tuttavia, una delle maggiori limitazioni di ARPANET era il protocollo su cui si basava, l'NCP (Network Control Protocol), chiuso e limitato, che funzionava esclusivamente all'interno della stessa rete. Ciò rese necessaria, nel 1983, la transizione al TCP/IP che permise a reti separate di dialogare tra loro e segnò il momento in cui la rete divenne, tecnicamente, l'Internet (Leiner et al., 2009).



1.2 Tim Berners-Lee al CERN, 11 luglio 1994. Foto di autore ignoto. CERN.

Tra il 1989 e il 1991, l'Internet era utilizzato specialmente in ambito accademico e governativo, ma restava ancora poco accessibile agli utenti non esperti. Ed è proprio grazie al CERN di Ginevra, in particolare a Tim Berners-Lee, che venne sviluppato il primo browser, chiamata **WorldWideWeb**, un servizio completamente gratuito e di dominio pubblico, rinunciando addirittura a qualsiasi brevetto (CERN, s.d.).

Nel 1995, Microsoft include Internet nel nuovo sistema operativo Windows 95, permettendo a chiunque possedesse un computer di collegarsi facilmente alla rete (Zittrain, 2008).



1.3 Steve Jobs presenta il primo iPhone al Macworld, 9 gennaio 2007. Foto di P. Sakuma. Associated Press.

Nel 1995, Microsoft include Internet nel nuovo sistema operativo Windows 95, permettendo a chiunque possedesse un computer di collegarsi facilmente alla rete (Zittrain, 2008).

Fu però nel 2007 che Internet divenne realmente accessibile ovunque e in ogni momento: in quell'anno Steve Jobs presentò il primo **IPhone**, un dispositivo dal design innovativo che racchiudeva in sé funzioni diverse, dalla segreteria telefonica all'accesso a Internet, permettendo di navigare sul web e di consultare facilmente meteo, mappe, quotazioni in borsa ed e-mail. Questo segnò la transizione verso un nuovo livello di connessione, sempre attiva ed ovunque disponibile (Zittrain, 2008).

1.2 IL PESO INVISIBILE DEI DATI

Ogni ricerca, foto, file, servizi di posta elettronica, messaggi e, più in generale, il web stesso, rappresentano un dato. In particolare, con la nascita del WorldWideWeb, lo stile di vita della popolazione globale è stato profondamente modificato, e continua, ancora oggi, a trasformare interi settori e culture. Ogni giorno, a livello mondiale, vengono generati **milioni di nuovi dati** da parte degli utenti e, con l'avvento dell'Intelligenza Artificiale, questo fenomeno si è ulteriormente intensificato (Barroso et al., 2019).
Nell'immaginario collettivo si pensa spesso che i dati non risiedano in alcun luogo fisico: ogni volta che un file viene archiviato, o un video riprodotto in streaming, si tende ad immaginare che questi servizi abitino in uno **spazio etereo**, sospeso, privo di peso e di collocazione (Shuja et al., 2016).

Nella realtà, però, i dati risiedono nel *cloud* che, a dispetto del suo nome, non è un'entità astratta, ma poggia su un'infrastruttura fisica ben precisa: i data center, edifici di dimensioni colossali collegati tra loro in un'unica rete globale che, nel suo insieme, funziona come un unico grande computer. Servizi utilizzati quotidianamente, dall'archiviazione dei file alla ricerca web, fino all'Intelligenza Artificiale, si appoggiano a questa enorme infrastruttura fisica, che rappresenta, a tutti gli effetti, il sistema nervoso centrale del mondo contemporaneo. Questa condizione genera un apparente ossimoro tecnologico: se da un lato i dispositivi degli utenti sono passati da strutture dalla scala dei PC a dimensioni sempre più ridotte, fino a diventare quasi invisibili, dall'altro essi si appoggiano ad infrastrutture di dimensioni colossali (Barroso et al., 2019).

Sebbene i data center costituiscano il cuore dell'economia digitale odierna, essi godono di una sorta di **invisibilità sociale e percettiva**. Vengono infatti spesso realizzati ai margini della città, privi di segnaletica riconoscibile e raramente visitati. Proprio per questo, l'utente finale continua a percepire il servizio digitale come qualcosa di immateriale, mentre, in realtà, si tratta di enormi scatoloni il cui impatto ambientale ed estetico sul paesaggio è tutt'altro che trascurabile.

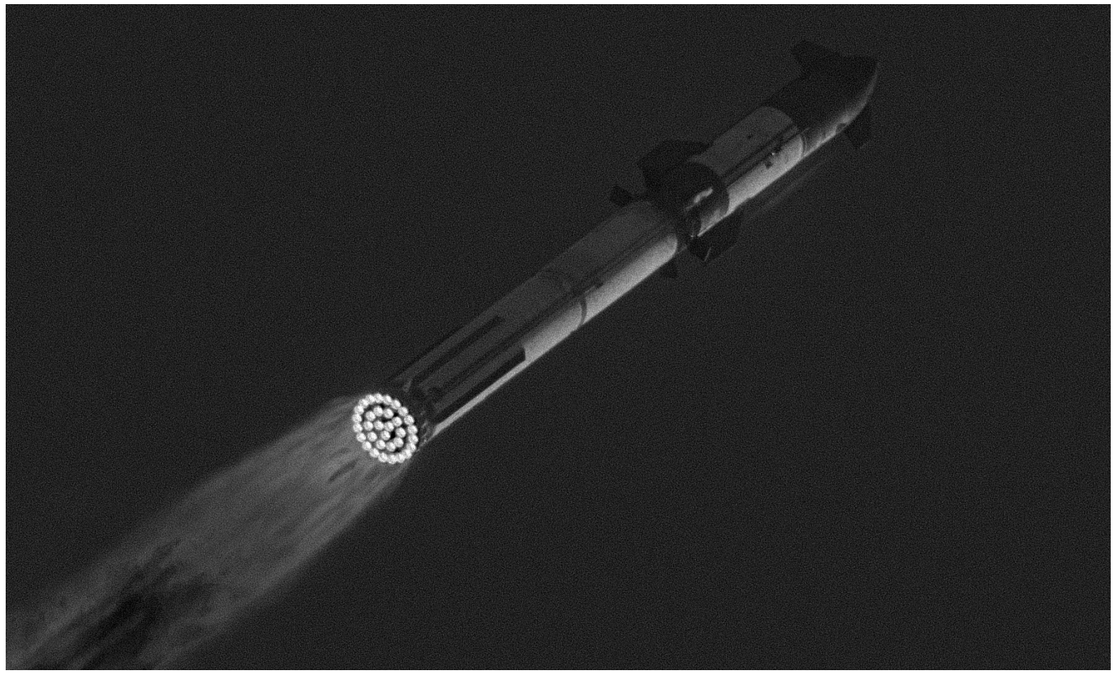
I data center possono essere considerati infatti come le fabbriche dell'era digitale: edifici di grandi dimensioni che costituiscono la base della nostra **società immateriale** e forniscono dei servizi attraverso una rete di strutture distribuite su scala globale (Shuja et al., 2016). L'innovazione continua è al centro di questo nuovo mondo, teso a raggiungere sempre la massima efficienza e velocità nella risposta. Tale efficienza, però, comporta un costo ambientale tutt'altro che invisibile, nient'altro che il prezzo di questa rivoluzione digitale (Barroso et al., 2019).

Questa rete di data center, distribuiti su scala globale, è in continua crescita anno dopo anno. Ai data center principali, di tipo ***hyperscale***, si affiancano migliaia di altre strutture minori, anch'esse distribuite su scala mondiale. Inizialmente, i data center erano ospitati in strutture note come colocation, e solo intorno al 2003 si è iniziato a progettare l'edificio stesso come un unico e colossale computer. Basti pensare che Google sperimentò i suoi primi data center in container, prima di passare al classico design a magazzino, tutt'oggi ancora prevalente (Barroso et al., 2019).



1.4 Squalo morde un cavo sottomarino, 2014. Fotogramma di autore ignoto. Repubblica.it.

Negli ultimi anni l'**Intelligenza Artificiale** ha determinato un aumento esponenziale nella domanda di elettricità richiesta dai data center. Questo ha portato a una crescente consapevolezza dell'elevata quantità di energia richiesta e, di conseguenza, alla ricerca di soluzioni innovative in grado di mitigare l'impronta ambientale.
L'elaborazione e l'archiviazione dei dati sembrano avere un impatto sempre più rilevante sulla terraferma e, per questo motivo, alcuni progetti hanno indirizzato la propria ricerca nella realizzazione di **data center sottomarini**, infrastrutture digitali che ospitano server racchiusi in capsule sigillate, posizionate sul fondale oceanico. Le capsule sono collegate alla terraferma tramite **cavi sottomarini**, che assicurano la trasmissione dei dati. I data center sottomarini sfruttano le condizioni naturali dell'oceano, poiché il raffreddamento avviene tramite scambio termico diretto con l'acqua marina (Udinmwen, 2025).



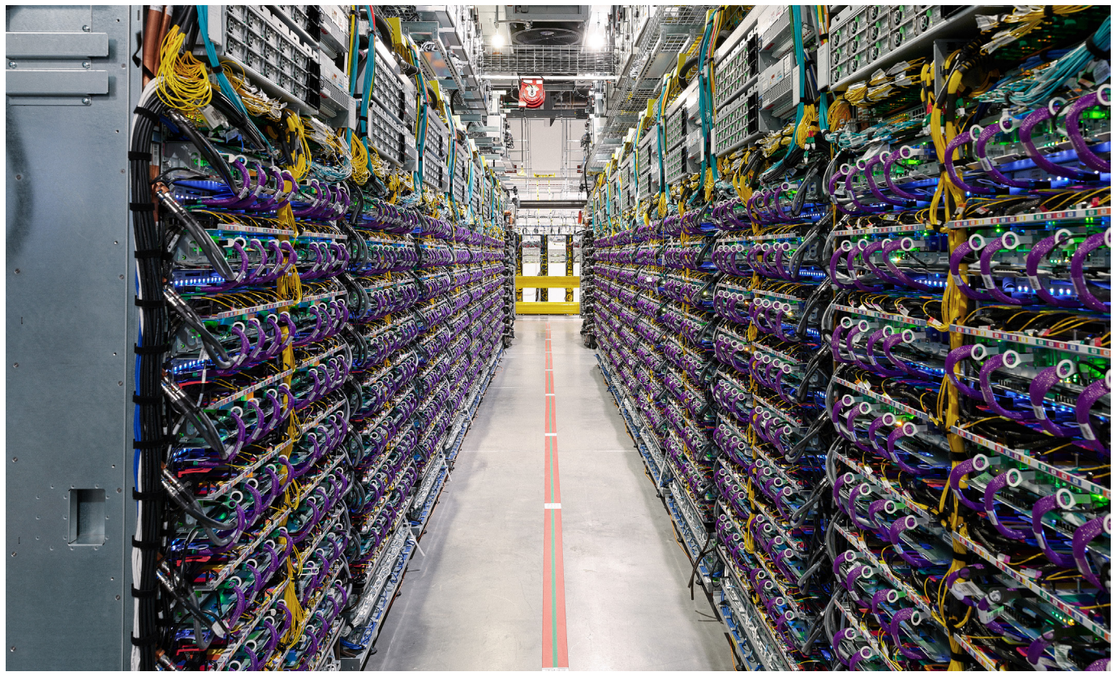
1.5 Booster Falcon 9 durante la fase di rientro con alette a griglia, data ignota. Immagine di SpaceX, tratta dal documento di presentazione del progetto Orbital AI Compute. In Space Exploration Technologies Corp., Form S-1, SEC, 20 maggio 2026.

Il mare offre una soluzione ancorata al pianeta, capace quindi di sfruttare le risorse naturali per il raffreddamento. Altri progetti, invece, estendono l'espansione dei data center oltre i confini terrestri. Elon Musk, con il nuovo progetto Space X, vuole realizzare un ***orbital AI compute***, ovvero data center che non si trovano più sulla superficie terrestre, bensì nello spazio. Space X intende infatti costruire una costellazione di satelliti che fungeranno da veri e propri **data center orbitali**. Questo progetto, oltre nascere dalla consapevolezza che ''la Terra non basta", è motivato anche dal fatto che, nello spazio, l'energia solare è illimitata e i pannelli solari orbitali sono quindi in grado di generare, a parità di superficie, oltre cinque volte l'energia prodotta sulla Terra, mentre il raffreddamento dei server avviene in modo naturale, sfruttando le condizioni dell'ambiente spaziale (Space Exploration Technologies Corp, 2026).



1.6 Vista diurna del campus data center di New Albany (Ohio), edifici 3, 2 e 1, data ignota. Foto di Google. Google Data Centers.

1.3 LE FABBRICHE DELL’ERA DIGITALE



1.7 Vista ravvicinata di un corridoio di server, campus data center di New Albany (Ohio), data ignota. Foto di Google. Google Data Centers.

1.3.1 Struttura

Nell'immaginario collettivo, i data center sono associati a scatoloni di grandi dimensioni, al cui interno si susseguono file di rack che sembrano estendersi all'infinito. Si tratta di luoghi progettati per ospitare macchine e non esseri umani. In questi impianti tutto è controllato: l'accesso è rigidamente regolamentato, mentre la temperatura, l'umidità e l'infrastruttura elettrica sono costantemente monitorate. Se da un lato però nulla sembra essere lasciato al caso, dall'altro i data center si trovano in un equilibrio precario, in cui il minimo errore, un cambiamento della temperatura o dell'umidità, è in grado di compromettere l'intera struttura.

Prima di affrontare tutte le problematiche derivanti da queste fabbriche dell'era digitale, è necessario descriverne la struttura. I data center, come appena accennato, dal punto di vista paesaggistico, presentano un impatto visivo significativo, si tratta di edifici estesi e compatti, caratterizzati per lo più da semplici architetture, simili a degli scatoloni.

Internamente, ogni edificio di un data center è costituito da tre componenti principali:
- **infrastruttura meccanica**;
- **infrastruttura elettrica**;
- **infrastruttura IT** (Barroso et al., 2026).
Quest'ultima rappresenta il nucleo funzionale del data center, in quanto ospita i server e le apparecchiature responsabili dell'elaborazione, archiviazione e trasmissione dei dati (Barroso et al., 2026).

L' **infrastruttura meccanica** comprende i **sistemi di raffreddamento** necessari a mantenere condizioni operative adeguate per i server. Tra questi si trovano i gruppi frigo (*chillers*), che sfruttano un ciclo a compressione per raffreddare l'acqua impiegata nei circuiti di raffreddamento interni, e le torri di raffreddamento (*cooling towers*), che consentono di trasferire il calore residuo verso l'ambiente esterno (Barroso et al., 2026).

L'**infrastruttura elettrica**, invece, comprende i generatori, le unità di distribuzione dell'energia (*Power Distribution Unit*, PDU) e i gruppi di continuità (*Uninterruptible Power Supply*, UPS). Questi ultimi svolgono un ruolo fondamentale, si occupano di intervenire istantaneamente, tramite sistemi a batteria, in caso d'interruzione della fornitura elettrica (Barroso et al., 2026).

In questo modo, gli UPS garantiscono ai server la continuità operativa nei primi minuti successivi al blackout, fino all'entrata in funzione dei gruppi elettrogeni. Questi ultimi costituiscono un sistema di alimentazione d'emergenza progettato per fornire energia elettrica al data center in caso di guasto della rete principale e sono generalmente costituiti da un motore a combustione interna, alimentato a diesel o a gas, accoppiato a un generatore (Jabeck, 2014).

Per ultimo, l'**infrastruttura IT** è costituita dai server e da apparecchiature dedicate all'elaborazione, archiviazione (storage) e networking. Questi componenti sono organizzati in file parallele e formano **corridoi caldi e corridoi freddi**, una configurazione progettata per ottimizzare i flussi d'aria e migliorare l'efficienza energetica (Barroso et al., 2026). Negli ultimi anni, nei data center di più recente costruzione, vengono adottate soluzioni avanzate, come il **raffreddamento a vasca** (***tank cooling***), in cui i server e altre componenti IT, vengono immersi in apposite vasche contenenti del fluido dielettrico, spesso a due fasi, consentendo una maggiore efficienza nella dissipazione del calore e, di conseguenza, densità di potenza elevate (Kanbur et al., 2020). Per quanto riguarda gli **apparati di rete**, responsabili delle attività di networking, questi garantiscono la connessione tra server, sistemi di storage e altre risorse. Nella maggior parte delle strutture, tali apparati vengono collocati in aree dedicate, nei quali i cluster di server comunicano tramite reti locali (*Local Area Network*, LAN) o reti geografiche (*Wide Area Network*, WAN), operando in modo coordinato come un unico sistema unificato (Barroso et al., 2026).

L'infrastruttura IT è inoltre organizzata in apposite strutture metalliche **rack**, che vengono disposte in file parallele formando, come detto in precedenza, i corridoi delle sale dati. Ogni rack può ospitare un numero variabile di server, generalmente compreso tra 20-40 unità, ma in alcuni casi può arrivare fino a 64 unità. I server rappresentano la componente di base dell'infrastruttura IT e sono installati in moduli o vassoi estraibili (tray), che contengono i principali componenti hardware, tra cui il microprocessore (CPU), la memoria RAM, le schede di rete ad alta velocità e, sempre più frequentemente, acceleratori hardware come la GPU, utilizzati per l'elaborazione di carichi di lavoro complessi come quelli legati all'intelligenza artificiale (Barroso et al., 2026).



1.8 Tubazioni del sistema di raffreddamento, data center di The Dalles (Oregon), data ignota. Foto di Google. Google Data Centers.

1.3.2 Funzionamento

L'**energia** è alla base del funzionamento di queste **fabbriche digitali**. In un data center, infatti, l'energia proviene generalmente dalla **rete elettrica pubblica**, talvolta integrata da impianti da fonti rinnovabili locali. L'elettricità in ingresso, trasmessa ad alta tensione, viene ridotta a livelli di tensioni medi o bassi attraverso degli appositi trasformatori e, successivamente, convogliata verso i gruppi di continuità (UPS) (Barroso et al., 2026).

Gli UPS stabilizzano e filtrano il flusso elettrico, garantendo continuità operativa in caso di interruzioni o blackout temporanei. L'energia viene poi smistata alle unità di distribuzione dell'alimentazione (*Power Distribution Unit*, PDU) o, nei data center di più recente progettazione, alle barre conduttrici (*busbar*), e viene convogliata verso i rack e i singoli server (Barroso et al., 2026).

Parallelamente, il sistema integra dei **generatori di emergenza**, pronti ad intervenire in caso di guasto prolungato alla rete principale e, in questo modo, assicurando l'autonomia energetica dell'intero impianto (Barroso et al., 2026).

Una volta giunta ai server, l'energia elettrica viene quasi interamente convertita in **calore** come conseguenza dei processi di elaborazione elettronica, che viene trasferito all'esterno dell'edificio. Tale aspetto è particolarmente critico, in quanto il calore generato deve essere rimosso in maniera efficace per evitare il surriscaldamento e possibili danni ai componenti hardware (Barroso et al., 2026).

Il **sistema di raffreddamento** preleva il calore prodotto dai server e lo trasferisce all'esterno dell'edificio. Nella configurazione tradizionale a corridoi, in particolare, l'aria fredda viene immessa nella parte anteriore dei rack (**corridoio freddo**), attraversa i server assorbendo il calore e viene espulsa nella parte posteriore (**corridoio caldo**).

L'aria calda viene successivamente convogliata verso le unità di trattamento e raffreddamento, dove cede il calore e viene nuovamente immessa nel corridoio freddo, generando un ciclo continuo (Barroso et al., 2026).

In caso di malfunzionamento del sistema di raffreddamento, la temperatura all'interno della sala server potrebbe aumentare rapidamente, raggiungendo valori critici intorno ai **100°C in pochi minuti**. In tali circostanze è necessario lo spegnimento immediato delle infrastrutture IT, detto spegnimento di emergenza (*Emergency Power Off,* EPO), per prevenire danni ai componenti (Barroso et al., 2026).

Dal punto di vista termodinamico, i data center producono una quantità trascurabile di lavoro meccanico, poiché quasi tutta l'energia elettrica consumata viene convertita in calore, che deve essere successivamente dissipato per garantire il corretto funzionamento dei sistemi (Barroso et al., 2026). Il calore rimosso dai server viene trasferito ai sistemi di dissipazione esterni, come le **torri di raffreddamento**, nelle quali viene rilasciato nell'ambiente esterno attraverso processi evaporativi. In molti impianti, prima di raggiungere le torri di raffreddamento, il fluido viene ulteriormente raffreddato mediante gruppi frigo (chiller), che utilizzano cicli frigoriferi a compressione (Barroso et al., 2026).

Il funzionamento dei **gruppi frigo** comporta un consumo significativo di energia elettrica e rappresenta una delle componenti a **maggiore fabbisogno energetico** all'interno di un data center (Barroso et al.,2026).

2. IMPRONTA AMBIENTALE

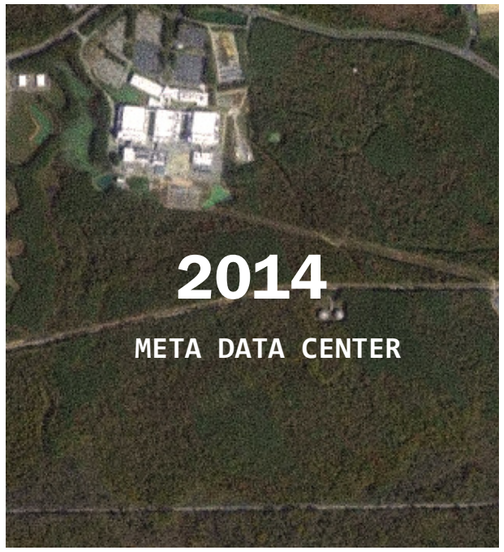
2.1 IL CONSUMO ENERGETICO

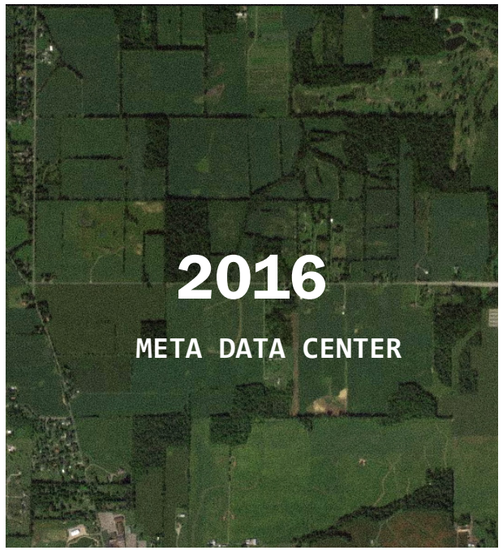
2.2 IL *CLOUD* DI CO_2

2.3 L’IMPRONTA IDRICA

2.4 L’ISOLA DI CALORE

2.5 IL RUMORE DEL DATO



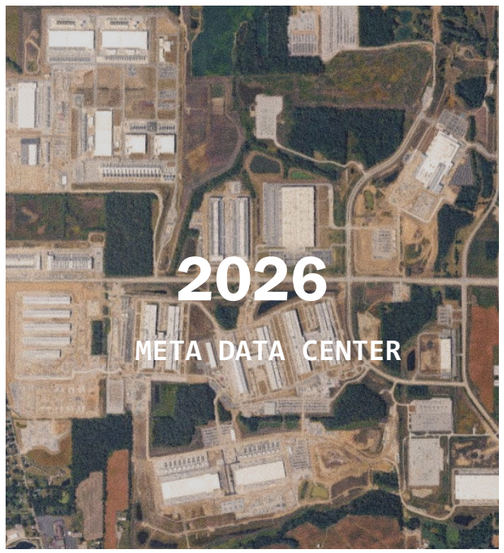








2.1 Meta Data center Sandstone, VA



2.2 Meta Data center New Albany, OH



2.3 OpenAI Data center Abilene, TX



2.4 XAI Data center Memphis, TN

Ortofoto: Google Earth

Qual è il vero impatto ambientale di queste fabbriche digitali?



Distribuzione globale dei data center per area geografica. Elaborazione propria su dati Data center Map.



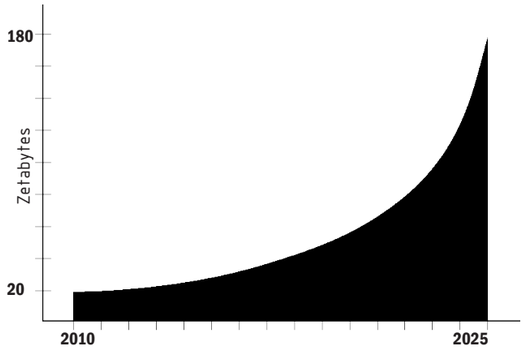
2.5 Lavoratore smista componenti elettronici presso Ecowork, impianto di riciclo e-waste a Ghaziabad, 12 febbraio 2026. Foto di AFP. In "Junk to high-tech: India bets on e-waste for critical minerals", Jordan Times, 2026. https://jordantimes.com/news/business/junk-to-high-tech-india-bets-on-e-waste-for-critical-minerals

Il panorama globale è caratterizzato da un processo di digitalizzazione sempre più diffuso. La **crescita esponenziale dei dati** determina una pressione costante per la realizzazione di nuovi spazi destinati all'archiviazione e all'elaborazione delle informazioni (Networking, 2016). A questo scenario, già segnato da una rapida espansione dei servizi digitali tradizionali, si è sovrapposto l'avvento dell'Intelligenza Artificiale. Questa tecnologia ha impresso un'ulteriore accelerazione alla domanda, rendendo necessaria la **costruzione di nuovi data center** (Morley et al., 2018).

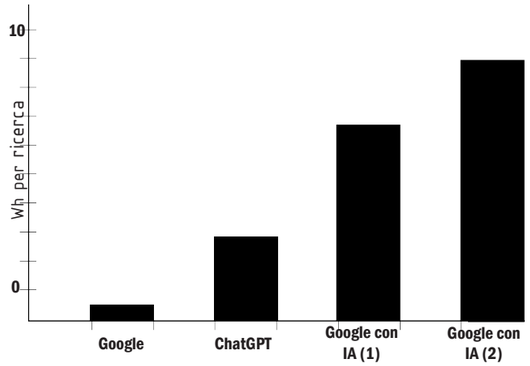
La crescente diffusione di tecnologie genera un impatto ambientale significativo: oltre al **consumo energetico** e alle ingenti **emissioni di CO_2**, si registra anche un elevato **consumo idrico** derivante dai sistemi di raffreddamento e un rapido tasso di **obsolescenza dei server**. Infatti, il ciclo di vita di questi è estremamente breve, ciò comporta una pressione costante per l'estrazione delle materie prime e sulla gestione dei rifiuti elettronici (Makrak-Singh, 2025).

Il panorama globale è caratterizzato da un processo di digitalizzazione sempre più diffuso. La **crescita esponenziale dei dati** determina una pressione costante per la realizzazione di nuovi spazi destinati all'archiviazione e all'elaborazione delle informazioni (Networking, 2016). A questo scenario, già segnato da una rapida espansione dei servizi digitali tradizionali, si è sovrapposto l'avvento dell'Intelligenza Artificiale. Questa tecnologia ha impresso un'ulteriore accelerazione alla domanda, rendendo necessaria la **costruzione di nuovi data center** (Morley et al., 2018).

La crescente diffusione di tecnologie genera un impatto ambientale significativo: oltre al **consumo energetico** e alle ingenti **emissioni di CO_2**, si registra anche un elevato **consumo idrico** derivante dai sistemi di raffreddamento e un rapido tasso di **obsolescenza dei server**. Infatti, il ciclo di vita di questi è estremamente breve, ciò comporta una pressione costante per l'estrazione delle materie prime e sulla gestione dei rifiuti elettronici (Makrak-Singh, 2025).



Crescita annuale della creazione e consumo di dati digitali a livello globale 2010-2015. Elaborazione propria su dati IDC Global Datasphere (2018).



Stime del consumo energetico delle ricerche Google integrate con l'IA. Elaborazione propria su dati De-Vries (2023).

2.1 IL CONSUMO ENERGETICO

In una prima fase del dibattito scientifico, diversi studi avevano evidenziato un raddoppio del consumo energetico nei dati center negli ultimi dieci anni e ipotizzavano una triplicazione o addirittura una quadruplicazione per gli anni successivi (Bawden, 2016; Belkhir & Elmeligi, 2018). Studi più recenti, però, hanno parzialmente ricalibrato queste stime, dimostrando che, nonostante l'aumento dei volumi di dati, la crescita dei consumi energetici reali risulta essere più contenuta rispetto alle previsioni. Tale differenza è attribuibile ai miglioramenti in termini di efficienza energetica e ottimizzazione dei sistemi di raffreddamento (Masanet et al., 2020).

Tuttavia, l'utilizzo sempre più esteso e intensivo dei sistemi di **Intelligenza Artificiale** impone dei **carichi energetici di gran lunga superiori** rispetto ai soli servizi digitali tradizionali (De Vries-Gao, 2026). Recenti stime ipotizzavano che, entro la fine del 2025, i sistemi IA potessero rappresentare la metà della domanda totale di elettricità richiesta dai data center (IEA, 2025), un volume paragonabile al fabbisogno energetico dell'intero Regno Unito (De Vries-Gao, 2026).

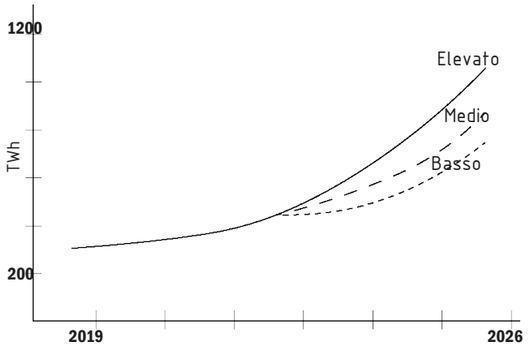
I data center occupano oggi una posizione centrale nel dibattito ambientale e sociale globale. Tali strutture sono caratterizzate da una **crescita esponenziale**: è stato calcolato che nel 2022 la domanda elettrica di tutti i data center a livello mondiale si attestasse intorno ai 460 TWh, pari al 2% del consumo energetico mondiale, ma che nel 2026, in funzione dell'aumento dell'intelligenza artificiale, il consumo elettrico nel caso base raggiunga 800 TWh (IEA, 2024).

In particolare, si è evidenziata una crescita molto rapida di queste infrastrutture negli Stati Uniti: se tra il 2014 e il 2016 il fabbisogno energetico era stimato in 60 TWh, negli anni successivi questa cifra è cresciuta in modo significativo. Infatti, l'avvento dell'Intelligenza Artificiale (IA) ha innescato una rapida accelerazione. Nel 2018, quando i modelli IA non erano ancora ampiamente utilizzati, l'energia richiesta dai data center rappresentava l'1,9% del consumo elettrico totale degli Stati Uniti (Shehabi et al., 2024).

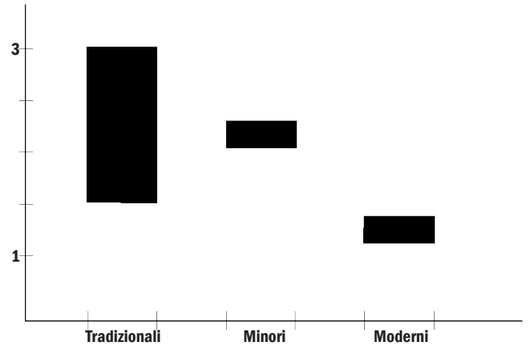
Successivamente, nel 2022, questi sistemi IA sono andati incontro ad una rapida crescita, dimostrazione di questo è l'azienda OpenAI con ChatGPT che, in soli due mesi, ha ottenuto 100 milioni di nuovi utenti (De Vries-Gao, 2023). Questo ha comportato, nel 2023, un aumento del consumo elettrico arrivando al 4,4% dell'intero fabbisogno energetico degli Stati Uniti. Pertanto, i modelli IA sono in continua crescita e, per questo motivo, le proiezioni indicano che entro il 2028 questa percentuale potrebbe attestarsi tra il **6,7% e il 12% dell'intero fabbisogno energetico nazionale** (Shehabi et al., 2024).

Un altro dato rilevante è che l'**IA generativa**, finalizzata alla creazione di contenuti complessi come testi, immagini e video, richiede un consumo elettrico estremamente elevato, determinando un impatto ambientale sempre più complesso da monitorare. Oltre alla crescita del numero di utenti, la principale criticità risiede nel ciclo di vita di questi modelli: i sistemi IA necessitano di una fase iniziale di addestramento (*training*) e una successiva fase di inferenza, durante la quale il modello genera le risposte agli utenti. Entrambi i processi risultano energeticamente dispendiosi (De Vries-Gao, 2023). Patterson et al. (2022), analizzando i report di Google, hanno evidenziato come la sola fase di inferenza sia stata responsabile, tra il 2019 e il 2021, del 60% del consumo energetico totale legato all'IA. Ed è stato dimostrato come l'addestramento e l'implementazione di modelli generativi di grandi dimensioni, quali GPT-3, vengano effettuati su server ad alto consumo con un dispendio energetico di 1287 MWh (Li et al., 2025).

Inoltre, l'integrazione dell'IA nei motori di ricerca standard potrebbe portare ad un fabbisogno elettrico insostenibile: l'implementazione dell'IA in ogni singola ricerca web porterebbe a un **consumo elettrico annuo** pari a quello di un'intera nazione come l'**Irlanda** (De Vries, 2023).



Previsione di crescita del consumo energetico annuo dei data center a livello globale 2019–2026. Elaborazione propria su dati IEA (2024).



Indicatore di efficienza energetica (PUE) per data center tradizionali, minori e più recenti, il valore ideale è pari a 1 e tecnicamente irraggiungibile. Elaborazione propria su dati Belady et al. (2008) e Ziaei et al. (2025).

L'analisi dell'impatto ambientale dei data center richiede l'introduzione di alcuni concetti fondamentali, tra cui la **potenza IT**, la **potenza elettrica totale** e l'**indicatore di efficienza energetica** (*Power Usage Effectiveness* - **PUE**) (Belady et al., 2008).

In fisica, la **potenza** è definita come la quantità di energia trasferita in un'unità di tempo: rappresenta quindi la rapidità con cui l'energia viene prodotta, convertita o consumata ed è espressa nel Sistema Internazionale in watt (W), equivalenti a joule al secondo (J/s) (Serway & Jewett, 2014).

La potenza si distingue dal **consumo energetico**, che indica, invece, l'energia totale utilizzata in un determinato intervallo temporale ed è espressa in kilowattora (kWh) (Bertolini et al., 2025).
L'energia totale consumata in un intervallo di tempo è data dal prodotto tra la potenza e il tempo di funzionamento:

$$E = P \cdot t \tag{2.1.1}$$

Tuttavia, nel caso specifico di un data center, operante in modo continuo, l'energia annua può essere data da:

$$E\ annua = P\ elettrica \cdot t\ annuo \tag{2.1.2}$$

In cui, t annuo corrisponde a 8760 ore (Serway & Jewett, 2014).

Nei data center, l'impatto ambientale è strettamente legato alla potenza e, in particolare, al consumo di energia elettrica necessario ad alimentare sia l'infrastruttura IT sia quella elettrica e meccanica. In tale contesto, è opportuno distinguere tra diverse tipologie di potenza:
- La **potenza IT** (*IT Equipment Power*), definita come potenza critica, rappresenta il carico elettrico assorbito solo dalle apparecchiature informatiche, quali server, sistemi di archiviazione (*storage*) e apparati di rete (*networking*). Essa costituisce la potenza direttamente impiegata per l'elaborazione e la gestione dei dati (Belady et al., 2008).
- La **potenza elettrica totale** (*Total Facility Power*) corrisponde alla potenza che viene complessivamente assorbita dall'intera struttura. Questo dato è particolarmente rilevante, poiché include, oltre l'infrastruttura IT, anche i sistemi di raffreddamento (chiller, pompe, ventilatori, torri di raffreddamento), i sistemi di distribuzione dell'energia (PDU, UPS, generatori, trasformatori), l'illuminazione, la sicurezza e le altre componenti meccaniche ed elettriche di supporto (Belady et al., 2008).

La potenza IT e la potenza elettrica totale costituiscono i parametri necessari per calcolare l'**indicatore di efficienza energetica** (*Power Usage Effectiveness* - **PUE**) e la relativa metrica, espressa in percentuale, denominata *Datacenter Infrastructure Efficiency* (**DCiE**). Tali indicatori, sviluppati dal consorzio globale *The Green Grid*, consentono di monitorare nel tempo l'efficienza energetica dei data center e di valutare l'efficacia delle strategie di ottimizzazione finalizzate a ridurre l'impatto ambientale (Belady et al., 2008).

L'indicatore **PUE** è definito dalla seguente equazione:

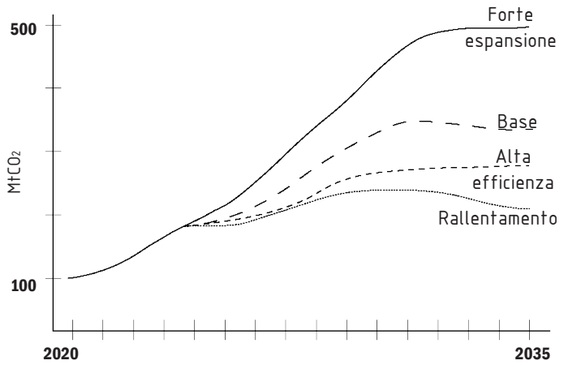
$$PUE = P\ elettrica\ /\ P\ IT \tag{2.1.3}$$

La metrica **DCiE** è invece data dal rapporto inverso, espresso in percentuale:

$$DCiE = (P\ IT/\ P\ elettrica\ ) \cdot 100\% \tag{2.1.4}$$

Dal punto di vista teorico, il PUE può assumere valori maggiori o uguali a 1,0. Il **valore 1,0** rappresenta la **condizione ideale** (e tecnicamente irraggiungibile), in cui tutta la potenza assorbita dalla struttura viene utilizzata solamente dalle apparecchiature IT, senza perdite elettriche o altri consumi. Valori prossimi ad 1,0 indicano una maggiore efficienza energetica e corrispondono, di conseguenza, a percentuali di DCiE elevate (Belady et al., 2008). Alcuni studi iniziali relativi ai data center **tradizionali** riportavano valori di PUE **compresi tra 1,5 e 3,0**. Un PUE pari a 3,0 indica un livello di efficienza molto basso, poiché implica che la potenza totale assorbita dall'intera struttura sia tre volte superiore a quella effettivamente impiegata dai soli sistemi IT (Belady et al., 2008). Negli ultimi anni, l'evoluzione tecnologica ha permesso di ottimizzare le strutture riducendo il consumo energetico. Per i data center di più recente costruzione, il PUE si attesta generalmente tra 1,15 e 1,3. Tuttavia, nelle strutture meno moderne, tale valore può ancora superare la soglia di 2,0, a causa di sistemi di raffreddamento e distribuzione meno efficienti (Ziaei et al., 2025).

Quanto pesa il cloud di dati?



Previsione emissioni di CO_2 globale dei data center: quattro scenari ipotizzati dal 2020 al 2035. Elaborazione propria su dati IEA (2025).

L'impatto ambientale dei data center è diventato una questione sempre più rilevante negli ultimi anni a causa della rapida crescita della domanda dei servizi digitali. Tra il 2010 e il 2018, ad esempio, i carichi di lavoro globali dei data center sono aumentati di oltre sei volte rispetto al 2010, e il traffico IP, ovvero il volume dei dati scambiati, è cresciuto di oltre 10 volte nello stesso periodo (Masanet et al., 2020). Al tempo stesso, sono stati introdotti miglioramenti nell'efficienza energetica, contribuendo a contenere l'impatto della crescita dei dati (IEA, 2023).

Nonostante questi progressi, l'espansione dei servizi digitali ha comportato un aumento delle emissioni di CO_2 associate ai data center. Secondo l'ultimo report pubblicato dall'International Energy Agency (IEA, 2023), nel 2020 le emissioni globali dei data center per il 2025 sono state stimate 300 milioni tCO_2/anno a livello globale. Lo scenario più pessimista, lift-off, ipotizza 475 milioni tCO_2/anno di emissioni entro i primi anni del 2030. Il fattore di maggiore preoccupazione è rappresentato dai **sistemi IA**, caratterizzati tuttavia da una mancanza di trasparenza dei dati: aziende leader come Google, Microsoft, Meta e Amazon, non specificano in maniera dettagliata nei propri report l'impatto ambientale derivante esclusivamente dall'utilizzo dell'Intelligenza Artificiale. Nonostante ciò, negli ultimi anni l'IA è diventata il motore principale del consumo elettrico dei data center. Alcune stime ipotizzano che, nel 2025, i sistemi IA siano stati responsabili di emissioni comprese tra 32,6- 79,7 milioni di tonnellate di CO_2. Per offrire una prospettiva concreta, tale cifra corrisponde alle **emissioni annuali di una metropoli come New York** (De Vries-Gao, 2026).

Inoltre, è opportuno sottolineare che l'impronta di carbonio di un data center dipende strettamente dalla sua ubicazione geografica e dalla rete elettrica a cui si appoggia. L'impatto varia drasticamente a seconda che l'energia derivi da fonti rinnovabili o da combustibili fossili (De Vries-Gao, 2026). In particolare, per calcolare le emissioni di CO_2di un data center, è necessario definire innanzitutto la *Carbon Usage Effectiveness* (**CUE**), introdotta dal consorzio globale *The Green Grid* come estensione del PUE. Questa metrica consente di determinare l'**impronta di carbonio** e, di conseguenza, di valutare la sostenibilità di un data center. La CUE è espressa in chilogrammi di anidride carbonica equivalente per kilowattora ($kgCO_2eq/kWh$) (Belady et al., 2010).

Per i data center che ricevono energia direttamente dalla rete elettrica, la formula è la seguente:

$$CUE = Emissioni_{tot}\ CO_{2\ DC} / Energia_{IT} \tag{2.2.1}$$

Tuttavia, esiste anche una formula alternativa:

$$CUE = CEF \cdot PUE \tag{2.2.2}$$

In questa espressione, il CEF (Carbon Emission Factor) indica il fattore di emissione di carbonio specifico del luogo in cui è situato il data center (Belady et al., 2010).

La CUE permette, dunque, di **valutare rapidamente la sostenibilità** e di valutare i benefici ambientali derivanti da operazioni di miglioramento, come l'integrazione di fonti di energia rinnovabile (Liu et al., 2024).

2.2 IL *CLOUD* DI CO_2

Quanti litri d'acqua consumano questi cluster ?

560 miliardi L/anno

Stima per l'anno 2023 del consumo idrico annuo dei data center a livello globale (IAE, 2025).

1200 miliardi L /anno

Previsione per il 2030 del consumo idrico annuo dei data center a livello globale (IAE, 2025).

2.3 IL CONSUMO IDRICO

Una delle critiche più rilevanti mosse alla costruzione di nuovi data center riguarda l'ingente quantità d'acqua consumata per il funzionamento di queste fabbriche digitali. Mentre il cambiamento climatico mette a dura prova intere regioni a causa di siccità sempre più frequenti e intense, l'approvazione e la costruzione di nuovi data center potrebbe aggravare ulteriormente una crisi idrica già esistente (Li et al., 2025).

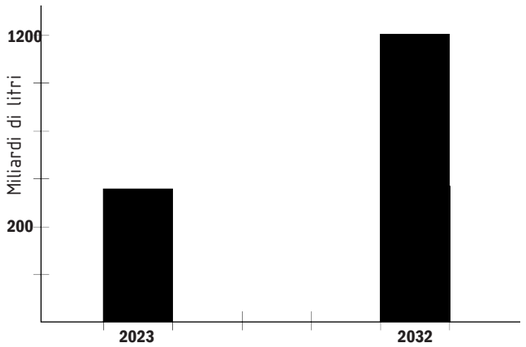
Analogamente a quanto accade per le emissioni di CO_2, la **trasparenza dei dati** rimane un punto critico. Sebbene le grandi aziende tecnologiche pubblichino report di sostenibilità, è estremamente difficile ottenere valori reali riguardo al consumo idrico di questi impianti (De Vries-Gao, 2026). Emblematico è il caso del data center di Google a *The Dalles*, in Oregon: a seguito di una lunga battaglia legale, il quotidiano *The Oregonian* ha ottenuto i documenti relativi al consumo idrico dei data center, rivelando che circa il **25% dell'intera disponibilità idrica della città** veniva assorbito da questi impianti (Rogoway, 2022).

Un ulteriore elemento di complessità riguarda la variabilità dei dati a seconda degli ambiti considerati. Il consumo idrico può essere distinto in tre categorie: un **consumo diretto** relativo all'acqua utilizzata per il raffreddamento (*scope 1*), un **consumo indiretto** legato alla produzione di elettricità (*scope 2*) e un consumo associato all'acqua impiegata nella **produzione di chip e server** (*scope 3*) (Li et al., 2025).

Il **consumo diretto** (scope 1) sta diventando un problema sempre più rilevante con l'introduzione dell'intelligenza artificiale, a causa degli elevati carichi termici generati. Nella maggior parte dei data center, l'energia elettrica viene convertita in calore dai componenti elettronici: tale calore viene estratto dalle sale server tramite unità di raffreddamento, trasferito ad un circuito idrico e infine dissipato all'esterno attraverso le torri di raffreddamento, in cui una quantità significativa dell'acqua viene dispersa in atmosfera sotto forma di vapore. La quantità di acqua che non evapora viene reimpiegata in altri cicli, ma solo per un numero limitato di volte, in funzione della sua qualità (Li et al., 2025). Un esempio concreto è fornito dai report di sostenibilità di **Google** (2024), dai quali emerge che, in un anno, sono stati prelevati **29 miliardi di litri di acqua** per i suoi data center e che di questi 23 miliardi di litri sono evaporati a seguito del loro utilizzo per il sistema di raffreddamento dei server.
Per quanto riguarda il **consumo indiretto** (*scope 2*) relativo alla produzione di energia elettrica, è importante sottolineare che il settore termoelettrico figura tra i principali consumatori idrici nella maggior parte dei paesi (Reig et al., 2020). Negli Stati Uniti, ad esempio, è stato stimato che il consumo idrico indiretto sia dodici volte superiore rispetto a quello diretto destinato al raffreddamento (Shehabi et al., 2024).

Infine, la **produzione di chip e server** (scope 3) comporta a sua volta un consumo idrico notevole. L'acqua impiegata in questi processi produttivi può contenere sostanze chimiche tossiche e rifiuti pericolosi, risultando di conseguenza non riciclabile (Frost & Hua, 2019). Anche in questo caso, sebbene i dati precisi sul consumo idrico per la produzione dei chip e server non siano pubblicamente disponibili, si tratta comunque di quantità significative (Li et al., 2025). La rilevanza di questo aspetto emerge chiaramente dal report di **Apple** (2020), nel quale viene dichiarato che il **99% del consumo idrico totale** dell'intera produzione aziendale è **attribuibile alla fabbricazione dei chip e dei server**. L'impronta idrica dei data center rappresenta dunque uno degli aspetti più critici di queste infrastrutture, aggravata ulteriormente dal fatto che l'acqua utilizzata debba essere di qualità elevata per evitare ostruzioni nelle tubature e proliferazioni batteriche nei circuiti di raffreddamento (Li et al., 2025). Nella maggior parte dei casi si tratta infatti di acqua potabile: dal report di Google (2024), citato in precedenza, emerge che dei 29 miliardi di litri di acqua prelevati, l'80% era costituito da acqua potabile.

La scarsa presenza di dati sul consumo idrico e la natura approssimativa delle stime disponibili, rendono complesso valutare il reale impatto idrico globale (Ristic et al., 2015). Tuttavia, l'*International Energy Agency* ha stimato che nel 2023 il consumo idrico totale corrispondesse a **560 miliardi di litri totali**, di cui 373 miliardi di litri per la produzione di energia elettrica, 140 miliardi di litri per il sistema di raffreddamento e 47 miliardi di litri per la produzione di hardware. Si ipotizza che entro il 2030 il consumo idrico totale raggiunga i **1200 miliardi di litri all'anno** (IEA, 2025).



Previsione per il 2032 del consumo idrico globale dei data center. Elaborazione propria su dati IAE (2025).



Scomposizione del consumo idrico globale dei data center nel 2023. Elaborazione propria su dati IEA (2023).

Gli Stati Uniti sono tra i principali responsabili di questi valori così elevati, infatti, si stima che la quantità di acqua consumata dai data center dell'intero paese nel 2023 fosse pari ai **60-70 miliardi di litri/anno.** E le previsioni per il 2028, invece, ipotizzano due possibili scenari, uno più ottimistico mentre l'altro pessimistico, con stime che oscillano tra 150 e 275 miliardi di litri l'anno (Shehabi et al., 2024).

L'IA determina uno degli aspetti più preoccupanti ed è stato stimato che il modello GPT-3 consumi circa **500 ml di acqua per ogni 20-50 domande poste dall'utente** (Li et al., 2025).

Al fine di quantificare il consumo idrico diretto di un data center, The Green Grid ha introdotto nel 2011 il parametro Water Usage Effectiveness (WUE), definito come il rapporto tra il consumo idrico giornaliero sul sito e l'energia delle apparecchiature IT (Patterson et al., 2011):

$$WUE = Consumo\ diretto / E_{IT} \tag{2.3.1}$$

Il WUE viene espresso con l'unità di misura litri per kilowattora (L/kWh) e il valore ideale è pari a 0, in quanto indicherebbe l'assenza di un consumo idrico diretto (Patterson et al., 2011).

Dunque, noto il valore WUE e l'energia IT, la stessa formula, applicata invertendo i termini noti, permette di stimare il consumo idrico giornaliero di uno specifico data center e di valutare l'impatto idrico a livello locale (Patterson et al., 2011).



2.6 Pennacchi di vapore sopra le torri di raffreddamento, colorati per rappresentare simbolicamente il calore disperso. Elaborazione propria su base fotografica: data center di The Dalles (Oregon), data ignota, foto di Google, Google Data Centers.

2.4 L'ISOLA DI CALORE

Uno dei passaggi più critici nel funzionamento di un data center è la **conversione dell'energia in calore**: il calore viene prelevato dalla sala server e successivamente rilasciato dalle torri di raffreddamento (Shehabi et al., 2024). Secondo la prima legge della termodinamica, l'energia non viene dispersa né distrutta, ma convertita. Pertanto, circa il 90-100% dell'energia in ingresso in un data center viene trasformata in calore (Wang et al., 2025; Energy, 2023).
È quindi possibile affermare che il calore generato è pari alla potenza elettrica assorbita dal data center, per cui (Energy, 2023):

$$Q_{tot} = P_{elettrica} \tag{2.4.1}$$

Il calore generato, qualora venisse rilasciato interamente nell'ambiente esterno, comprometterebbe il **microclima locale**, intensificando il fenomeno dell'isola di calore urbana nelle aree circostanti il data center e arrecando potenziali danni agli ambienti limitrofi (Zhang et al., 2015).

2.5 IL RUMORE DEL DATO

Una criticità ancora poco trattata, rispetto al consumo energetico, alle emissioni di CO_2 ed al consumo idrico, è quella dell'**inquinamento acustico** prodotto dai data center. La peculiarità di queste infrastrutture digitali è che lavorano ininterrottamente, giorno e notte, per tutto l'anno: si tratta dunque di un **rumore continuo e persistente**.

I principali responsabili del rumore prodotto da un data center, e della sua propagazione nell'ambiente esterno, sono i sistemi di raffreddamento, come ventilatori, chiller e torri di raffreddamento, e i generatori diesel, utilizzati solo in caso di emergenza. Una delle maggiori contestazioni da parte delle popolazioni che vivono nelle vicinanze di un data center è, come anticipato, la persistenza ininterrotta del rumore, che può comportare problemi di salute come ansia, emicrania, insonnia, aumento della pressione sanguigna e vertigini (Yañez-Barnuevo, 2026).

Per comprendere meglio l'entità di questo impatto, è utile considerare come il suono si propaghi dal data center fino alle abitazioni circostanti. La propagazione delle onde sonore prodotte dal data center è infatti un fenomeno influenzato da diversi meccanismi fisici, come la distanza dell'abitazione dalla sorgente primaria, la presenza di barriere, quali alberi, in grado di agire da schermatura, oppure le facciate di edifici limitrofi, che possono provocare il fenomeno della riflessione, aumentando i livelli sonori percepiti (*International Organization for Standardization*, 1996).

Il rumore prodotto è diverso dal rumore percepito, ed è proprio questa distinzione a rendere necessario l'uso di due grandezze acustiche differenti. Nel primo caso si fa riferimento al **livello di potenza sonora totale** (Lw), che rappresenta la quantità totale di energia acustica irradiata da una sorgente nell'unità di tempo e che, a differenza del rumore percepito, non dipende dalla distanza dall'osservatore.

Quando sono presenti più sorgenti identiche che operano simultaneamente, i loro livelli di potenza sonora non si sommano algebricamente ma logaritmicamente. Per calcolare la **potenza sonora totale** *Lw tot* si utilizza pertanto la seguente equazione (Bies & Hansen, 2024) (2.5.1):

$$Lw\ tot = Lw\ singolo + 10\ log10(N) \tag{2.5.1}$$

Per calcolare invece la **propagazione del suono**, ossia il **livello di pressione sonora percepito** a una certa distanza dalla sorgente, si fa riferimento alla norma internazionale ISO 9613-2, che costituisce il metodo ingegneristico standard per la previsione dei livelli di pressione sonora derivanti da sorgenti industriali all'aperto (*International Organization for Standardization*, 1996), secondo la seguente formula (2.5.2):

$$Lp = Lw + D\ - A \tag{2.5.2}$$

dove D è la correzione di direttività, che tiene conto di come la sorgente irradia il suono in una direzione specifica, e A è l'attenuazione totale che si verifica durante la propagazione, dovuta a distanza, assorbimento atmosferico, presenza di barriere e altro. Per un calcolo semplificato, che consideri la dispersione dell'energia sonora su una superficie sferica, la norma presuppone la seguente relazione (2.5.3):

$$A = 20\ log\ 10(d) + 11 \tag{2.5.3}$$

secondo cui:
d = 1 m, ovvero la distanza di riferimento (*International Organization for Standardization*, 1996).

3. INDIPENDENZA ENERGETICA

3.1 L’ERA RINNOVABILE

3.2 OLTRE LE FONTI RINNOVABILI: STRATEGIE INVISIBILI

3.3 IL CALORE DI SCARTO IN AGRICOLTURA



3.1 Il paesaggio illusorio: cavi elettrici sospesi in aria. Centrale elettrica e tralicci dell'alta tensione al tramonto, data ignota. Foto di Research Snipers. In Chidindego, "Time Series Analysis for Energy Generation", Medium, 2026. https://medium.com/@chidindego/time-series-analysis-for-energy-generation-b71a07302684

3.1 L'ERA RINNOVABILE

Al fine di mitigare questo enorme impatto ambientale descritto nel capitolo precedente, una **transizione verso le energie rinnovabili** è sempre più necessaria.

I **combustibili fossili** sono il motore della società odierna, dalla rivoluzione industriale fino ai giorni nostri. Il passaggio verso nuove fonti di energia è oggi imprescindibile per diverse ragioni, in quanto, i combustibili fossili, rappresentano delle fonti altamente inquinanti e limitate: il loro utilizzo sta accelerando il cambiamento climatico al punto che si stima un aumento della temperatura media mondiale, nei prossimi 80 anni, da 1°C fino a 2,9°C (Sijmons, 2014). Inoltre, queste risorse energetiche non rinnovabili si sono formate grazie alla decomposizione della materia organica accumulata nell'arco di milioni di anni e, pertanto, rappresentano una risorsa destinata ad esaurirsi. Proprio per questi motivi, la transizione verso un'**era rinnovabile** è sempre più necessaria. A questo si aggiunge un'ulteriore criticità: la dipendenza dai combustibili fossili è spesso causa di instabilità geopolitiche ed economiche e, molto spesso, di diversi conflitti armati (Sijmons, 2014).

Tuttavia, malgrado questo scenario appena descritto, la transizione energetica è ben lontana dall'essere realizzata: una delle principali ragioni è l'impatto estetico che comporterebbe sul paesaggio circostante. Si è abituati ad un **paesaggio illusorio**: il gas scorre silenziosamente sottoterra, mentre l'elettricità è visibile solo come una colonna di fumo all'orizzonte. In realtà, dietro quella colonna di fumo si cela una centrale alimentata da miniere sotterranee, altrettanto invisibili agli occhi dell'osservatore. L'unico dettaglio a disturbare questo paesaggio apparentemente incontaminato sono **i sottili cavi elettrici sospesi nell'aria**. L'energia non rinnovabile è quindi ancorata all'idea che non è necessario notare quanto questa sia ingombrante, sia in termini di infrastrutture sotterranee sia per l'enorme impatto ambientale che ne deriva (Sijmons, 2014).

La transizione verso un'era rinnovabile distrugge questa idea di paesaggio perfetto e porta in superficie tutti gli impianti energetici.

Il **paesaggio occultato diventa quindi visibile** e costringe la popolazione ad affrontare, anche visivamente, il **costo del proprio consumo energetico** (Sijmons, 2014).

Le energie rinnovabili si fondano sul principio secondo il quale le fonti naturali disponibili sulla Terra possono essere utilizzate per la produzione di elettricità. Tra queste rientrano il solare, l'eolico, l'idroelettrico e il piezoelettrico, quest'ultimo è una tecnologia emergente che sfrutta la deformazione meccanica di alcuni materiali per generare energia.

Le risorse rinnovabili sono altamente disponibili sul pianeta e si rigenerano di continuo. Tra queste si trova l'**energia solare** che, seppur soggetta ad intermittenza a causa dell'alternarsi del giorno e della notte e delle condizioni meteorologiche, risulta comunque molto efficace. Si può distinguere in due tipologie differenti: la prima, il solare termico, si occupa della conversione dell'energia solare in calore, mentre, la seconda, di maggiore interesse in questo caso studio, converte l'energia in elettricità. Quest'ultima consiste nell'installazione di celle fotovoltaiche in silicio che catturano i fotoni della luce solare, la cui energia libera elettroni all'interno del materiale semiconduttore, generando così corrente elettrica (Sijmons, 2014). Tuttavia, una delle maggiori contestazioni per questa energia pulita è che gli impianti fotovoltaici comportano un'**impronta spaziale** notevole. In particolare, per stimare l'energia prodotta da un impianto fotovoltaico è possibile utilizzare la seguente formula (Al-Quraan et al., 2022):

$$E = As \cdot r \cdot GR \cdot PR \tag{3.1.1}$$

Secondo la quale:
- *As* indica la superficie di pannelli solari necessaria
- *GR* corrisponde all'irraggiamento solare medio annuo
- *r* è l'efficienza del pannello
- *PR* indica la *Performance Ratio*

Con l'inverso di questa equazione è possibile risalire alla superficie d'installazione necessaria in relazione all'energia richiesta.



3.2 I pannelli solari ricoprono i pendii montuosi. Pannelli solari a Zhangjiakou, provincia dello Hebei (Cina), 2021. Foto di G. Baker / AFP. Getty Images.

Per quanto riguarda l'**energia eolica**, l'impatto estetico sul paesaggio è altrettanto notevole a causa delle dimensioni elevate delle turbine: il rotore, infatti, può arrivare ad un diametro di 100 m e l'altezza dell'intero impianto può raggiungere i 200 m. Il funzionamento consiste nelle pale che, grazie alla forza del vento, vengono messe in movimento e, tramite un generatore, l'energia cinetica viene convertita in energia elettrica. La velocità minima del vento affinché le pale inizino la rotazione, la cosiddetta ***cut-in speed***, varia in base alla taglia e alla tipologia dell'impianto: per le turbine di grande scala ad asse orizzontale si attesta generalmente tra **3 e 5,4 m/s**, mentre per turbine ad asse verticale, tipiche del mercato del micro-eolico, il valore può scendere fino a 0,7 m/s (Rosato et al., 2024). Pertanto, a basse velocità del vento, l'energia prodotta risulta quasi nulla (Masters, 2004). In generale, per proteggere la struttura, le turbine eoliche si fermano al raggiungimento della **velocità di cut-out**, che si attesta intorno ai 20 m/s (Rosato et al., 2024).

L'**energia idroelettrica**, invece, come le fonti precedenti, è una forma di energia pulita che sfrutta l'acqua per generare elettricità. Il funzionamento prevede la conversione dell'energia potenziale in elettrica: l'acqua viene convogliata verso un dislivello, detto salto, e incontra le pale di una turbina idraulica, mettendola in rotazione. A questo punto, grazie ad un generatore, l'energia meccanica della turbina viene convertita in energia elettrica. Per calcolare la potenza effettiva dell'impianto idroelettrico è possibile utilizzare la seguente formula (Jung et al., 2021):

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta \qquad (3.1.2)$$

secondo la quale:
- ρ indica la densità dell'acqua, espressa in kg/m3
- g è l'accelerazione di gravità, pari a 9,81 m/s2
- Q corrisponde alla portata d'acqua per unità di tempo, espressa in m3/s
- H è il dislivello, o salto, in m
- η indica l'efficienza della turbina e del generatore (Jung et al., 2021).

Per ultimo, la tecnologia emergente dell'**energia piezoelettrica** consiste in un sistema innovativo che trasforma le vibrazioni meccaniche e la pressione indotta dal passaggio dei velivoli aerei sulle piste aeroportuali in energia elettrica. Il sistema integra delle lastre piezoelettriche, capaci di generare un potenziale elettrico quando sottoposte a stress meccanico, grazie a dei generatori di dimensioni ridotte che convertono il tutto in energia elettrica. In particolare, l'aereo con il suo peso e movimento genera delle deformazioni e oscillazioni, convertite in energia elettrica che viene accumulata in batterie a litio per poi essere distribuita (Tifrit et al., 2025).

Nel caso specifico dei data center, tuttavia, **data l'enorme quantità di energia richiesta**, è necessario valutare la **fattibilità di questi impianti**, sia in termini di spazio sia di disponibilità reale delle fonti stesse, dato che, queste, dipendono in maniera intrinseca dalle condizioni climatiche e ambientali, ad esempio per il caso dell'energia solare ed eolica, oppure dalle sue condizioni morfologiche, come nel caso dell'energia idroelettrica.



3.3 Vapore che fuoriesce dalle torri di raffreddamento e che nella realtà potrebbe rappresentare una risorsa termica da riutilizzare in altre applicazioni. Data center di The Dalles (Oregon), data ignota. Foto di Google. Google Data Centers.

3.2 OLTRE LE FONTI RINNOVABILI: STRATEGIE INVISIBILI

L'impatto ambientale dei data center sta diventando un tema sempre più rilevante nel dibattito energetico globale. Per far fronte a questa criticità crescente, negli ultimi anni sono state sviluppate **nuove strategie** che consentono di considerare i data center non solo come **consumatori di ingenti quantità di energia**, ma anche come potenziali **produttori**, contribuendo così a ridurre l'impatto ambientale complessivo ed a migliorare la sostenibilità di questi impianti (Huang et al., 2020).

Tra le innovazioni tecnologiche più significative risultano il **recupero** e **riutilizzo del calore di scarto** generato dai data center (***Waste Heat Recovery***, **WHR**) e il **raffrescamento naturale** (***Free Cooling***). Queste due nuove strategie intervengono in sinergia sul data center: il free cooling riduce il consumo elettrico necessario per abbassare la temperatura delle sale dati, mentre il WHR, recupera una parte di quel calore per usi produttivi, escludendo qualsiasi sovrapposizione tra queste nuove tecnologie.

3.2.1
Free-cooling

Il ***free cooling*** è una tecnica di raffreddamento naturale che sfrutta le **condizioni climatiche dell'ambiente esterno**. Nella maggior parte del mondo, per diversi mesi l'anno la temperatura esterna risulta inferiore rispetto a quella interna (Alkrush et al., 2024). Questo permette al sistema di raffreddamento tradizionale di ridurre notevolmente la sua operatività nei mesi più freddi (Kargar & Moran, 2025).

Il sistema di raffreddamento tradizionale rappresenta tipicamente circa il 40% del consumo energetico di un data center (Kargar & Moran, 2025). Dagli studi è emerso che l'**integrazione del free cooling** potrebbe portare a un **risparmio fino al 67,2%** rispetto ai metodi di raffreddamento tradizionali (Alkrush et al., 2024), consentendo inoltre di raggiungere valori di PUE significativamente inferiori. Un esempio concreto è rappresentato da un data center in Turchia che, a seguito di 12 mesi di monitoraggio, ha dimostrato come il free cooling abbia consentito un risparmio dell'83% rispetto al sistema di raffreddamento e, inoltre, i valori di efficienza energetica, inizialmente pari a 1,8, sono diminuiti drasticamente fino a raggiungere un PUE pari a 1,1 (Güğül et al., 2023).

Il funzionamento del free cooling si basa sul fatto che, per la maggior parte dell'anno, la temperatura esterna risulta inferiore a quella interna alla sala server del data center. Il free cooling consente quindi di raffreddare le sale operative in modo naturale: la differenza di temperatura favorisce la dissipazione del calore verso l'esterno, determinando un **abbassamento della temperatura interna** (Zhang et al., 2014).

Il sistema opera secondo tre modalità differenti: **free cooling totale**, **parziale** e **raffreddamento meccanico**. La modalità dipende dalle condizioni climatiche esterne: quando la temperatura esterna è relativamente bassa, ovvero **inferiore ai 16°C**, il raffreddamento è gestito **totalmente dal free cooling** (Kim et al., 2024). La **modalità parziale** si attiva quando le temperature esterne sono moderate, **comprese tra i 16-21°C** (Dong et al., 2017).

In questo caso il free cooling viene utilizzato per il pre-raffreddamento dell'aria, integrando dei chiller meccanici per raggiungere la temperatura richiesta. Invece, nei mesi più caldi, quando le temperature esterne superano i 21°C, l'intero carico di raffreddamento è affidato esclusivamente alla refrigerazione meccanica tradizionale (Kim et al., 2024).

Una delle tipologie più efficienti è il ***free cooling air-side***, nel quale l'aria fresca esterna viene immessa direttamente nei corridoi del data center, talvolta con l'ausilio di ventilatori per facilitarne l'ingresso. Questa tipologia richiede tuttavia l'impiego di sistemi in grado di trattare l'aria proveniente dall'esterno: il sistema di ventilazione è pertanto spesso integrato da deumidificatori, filtri e purificatori dell'aria (Zhang et al., 2017).

Per stimare la potenza risparmiata grazie alla tecnologia del free cooling si può partire dalla formula (2.1.3) (Belady et al., 2008):

$$PUE = P_{elettrica} / P_{IT}$$

Da questa è possibile derivare la potenza risparmiata con la seguente equazione:

$$P_{risp} = (PUE_{base} \cdot P_{IT}) - (PUE_{free\ cooling} \cdot P_{IT})$$

$$= (PUE_{base} - PUE_{free\ cooling}) \cdot P_{IT} \quad (3.2.1.1)$$

Dato che l'energia, come descritto nel paragrafo 2.1, è data dal prodotto della potenza per le ore di funzionamento (Serway & Jewett, 2014). Nel caso del free cooling, si tengono in considerazione le ore in cui la temperatura è al di sotto del 16°C (Dong et al., 2017) ed è possibile risalire all'energia risparmiata:

$$E_{risparmiata} = (PUE_{base} - PUE_{free\ cooling}) \cdot P_{IT} \cdot h_{operative} \quad (3.2.1.2)$$

3.2.2
Waste heat recovery

Oltre al free cooling, un'altra tipologia di strategia invisibile, ovvero priva di un impatto estetico e paesaggistico, è quella del ***Waste Heat Recovery***. Questa nuova strategia permette di utilizzare il calore di scarto per diverse applicazioni, il calore ottenuto dalla conversione dell'energia in ingresso nel data center, quindi, anziché rappresentare uno scarto diventa una risorsa (Energy Market Authority, 2023).

In passato, questo calore veniva rilasciato completamente in atmosfera, contribuendo all'aumento delle temperature nelle zone limitrofe e compromettendo le realtà circostanti, portando ad una visione dei data center esclusivamente come semplici **consumatori di energia**. Negli ultimi anni, tuttavia, sono state sviluppate nuove tecnologie che consentono di recuperare e riutilizzare il calore di scarto, trasformando i data center da semplici consumatori di energia a **potenziali produttori**: proprio per questo motivo vengono definiti con il termine prosumer (Huang et al., 2020).

Questa nuova strategia prende il nome di **recupero del calore di scarto** (***Waste Heat Recovery***, **WHR**). Non tutto il calore generato è recuperabile nella stessa misura: quello proveniente dalle apparecchiature IT è più facilmente catturabile rispetto a quello prodotto dai sistemi di raffreddamento e ausiliari, in quanto i server operano a temperature più elevate (Huang et al., 2020). Considerando che circa il 40% dell'energia in ingresso viene utilizzata dalle apparecchiature IT (IEA, 2024), è possibile recuperare una quota significativa di questo calore. Lo studio di Lu et al. (2019) ha dimostrato che il modello proposto è stato in grado di recuperare fino al 68% del calore di scarto delle sole apparecchiature IT. Le stime più rilevanti ipotizzano una produzione annua di calore da parte dei data center compresa tra 70 e 170 TWh, di cui il 50-70%, corrispondenti a 35 e 85 TWh, potrebbe essere efficacemente recuperato e reimpiegato, una quantità paragonabile al consumo energetico annuo di Singapore (Energy, 2023).

Valori ancora più ottimistici emergono dal recente report dell'IEA (2025), secondo il quale il **70-80% del calore generato dai data center potrebbe essere recuperato**.

Per quantificare l'energia termica generata dai server che può essere effettivamente recuperata e reimpiegata in altre applicazioni si utilizza la **potenza termica recuperabile** (Q_{rec}), espressa in watt (W) e definita dalla formula seguente (Ashraf et al., 2026):

$$Q_{rec} = P_{elettrica} \cdot f_{rec} \cdot \eta\, hx \quad (3.2.2.1)$$

Secondo la quale:
- f_{rec} indica la frazione del calore teoricamente recuperabile, dipendente dalla tecnologia di raffreddamento utilizzata;
- ηhx corrisponde all'efficienza dello scambiatore di calore e del sistema di distribuzione (Ashraf et al., 2026).

Per determinare l'**energia termica annuale recuperata** (E_{rec}), espressa in kWh/anno, si moltiplica la potenza recuperabile per le ore di funzionamento annue (Ashraf et al., 2026):

$$E_{rec} = Q_{rec} \cdot h \quad (3.2.2.2)$$

dove h rappresenta le ore di funzionamento annue, che per un data center equivalgono a 8.760 ore (Ashraf et al., 2026).

Il WHR rappresenta dunque una delle strategie più promettenti per mitigare l'impatto ambientale dei data center e migliorare l'efficienza energetica. Il calore di scarto recuperato può essere impiegato in diverse **applicazioni** (Yuan et al., 2023), in funzione della **tipologia di raffreddamento** e della **temperatura** a cui il fluido si trova (Wang et al., 2025).

3.2.2.1
Temperatura del calore di scarto: il ruolo del sistema di raffreddamento

RAFFREDDAMENTO AD ARIA	**35-45°C**
RAFFREDDAMENTO AD ACQUA	**60-75°C**
RAFFREDDAMENTO AD IMMERSIONE (TANK COOLING)	**50-60°C** Monofase **70-80°C** Bifase

Temperatura del calore in uscita per le diverse tecnologie di raffreddamento dei data center. Il tank cooling consente temperature più elevate rispetto ai sistemi tradizionali. Elaborazione propria su dati Ebrahimi et al., 2015, Corigliani et al., 2024, Capozzoli & Primiceri, 2015 e Yuan et al., 2023.

La temperatura del calore dipende in modo determinante dalla tecnologia di raffreddamento adottata, questa può essere il **raffreddamento ad aria**, il **raffreddamento ad acqua** e il **raffreddamento ad immersione in un liquido** (Wang et al., 2025).

Nella maggior parte dei data center viene utilizzato il **raffreddamento ad aria** (*air cooling*), che prevede il posizionamento dei rack in corsie calde e fredde per ottimizzare i flussi d'aria e il ricircolo (Ebrahimi et al., 2014). Tale soluzione rappresenta quella meno produttiva dal punto di vista del recupero termico: il calore in uscita è caratterizzato da temperature relativamente basse, comprese tra i 35 e i 45 °C, che possono subire un'ulteriore riduzione nel momento in cui l'aria calda si mescola con quella della sala server prima della cattura (Ebrahimi et al., 2015; Huang et al., 2020). Per superare questo limite, negli ultimi anni sono state sviluppate alcune metodologie, tra cui le **pompe di calore**, che consentono di innalzare la temperatura del fluido recuperato in modo da poterlo impiegare nelle **reti di teleriscaldamento urbano** e nella **produzione dell'acqua calda sanitaria** (Davies et al., 2016; Wang et al., 2025). Esistono tuttavia anche applicazioni che non richiedono l'utilizzo della pompa di calore, infatti con temperature comprese tra i 35 e 45 °C, il calore di scarto può essere impiegato direttamente per il **riscaldamento di abitazioni**, **serre agricole**, **piscine** o **industrie** limitrofe al data center (Yang et al., 2023). Un esempio emblematico è lo *Stockholm Data Park* dove il calore di scarto è stato utilizzato per il riscaldamento di 2500 abitazioni, dimostrando la concreta fattibilità di questa integrazione in ambito urbano (Yuan et al., 2023). Nei data center di più recente costruzione viene adottato il **raffreddamento ad acqua** (*water cooling*), caratterizzato da un'efficienza significativamente superiore rispetto al sistema di raffreddamento ad aria. In questo sistema il liquido scorre all'interno di piastre di raffreddamento (*cold plates*), realizzate con metalli ad alta conducibilità termica come rame o alluminio, poste a contatto con i componenti principali dei server come CPU e GPU (Wang et al., 2025).

Le *cold plates* permettono di assorbire dal 65 all'80% del calore generato e di trasferirlo al liquido (Wang et al., 2025), che può raggiungere temperature in uscita comprese tra i 60 e i 75°C (Corigliani et al., 2024). Queste temperature rendono il ***water cooling*** significativamente più vantaggioso rispetto al raffreddamento ad aria: il calore di scarto recuperato può essere impiegato in diverse applicazioni, tra cui il riscaldamento, la produzione di acqua calda sanitaria e i processi industriali a media temperatura, senza dover ricorrere alla pompa di calore (Ashraf et al., 2026).

La tecnologia di raffreddamento più avanzata tuttavia risulta essere il **raffreddamento ad immersione** (*tank cooling* o *immersion cooling*), progettata per carichi di lavoro ad alta densità termica. Questa tecnologia consiste nell'immersione completa dei server in una vasca contenente un fluido dielettrico non conduttivo, che assorbe direttamente il calore generato dai componenti elettronici (Bansode et al., 2018). In base al comportamento del fluido da un punto di vista termodinamico, si possono distinguere due diverse tipologie: monofase o bifase. Nel caso del **raffreddamento ad immersione monofase**, il refrigerante mantiene lo stato liquido per l'intero ciclo di raffreddamento. Nel **raffreddamento ad immersione bifase**, invece, il refrigerante evapora direttamente a contatto con i componenti elettronici dei server e si condensa successivamente su una superficie posta nella parte superiore della vasca (Huang et al., 2020). Le temperature del fluido in uscita variano tra i **50 e i 60°C** per i sistemi **monofase** e possono raggiungere i **70 e i 80°C** nelle configurazioni **bifase** (Capozzoli & Primiceri, 2015; Yuan et al., 2023). Tali temperature rendono il *tank cooling* particolarmente adatto per applicazioni industriali, **processi di desalinizzazione** e per l'integrazione nelle **reti di teleriscaldamento urbano**, eliminando spesso la necessità di ricorrere a pompe di calore aggiuntive per l'innalzamento del potenziale termico (Ashraf et al., 2026).

3.2.2.2
Applicazioni:
dal riscaldamento urbano all'agricoltura

ACQUACOLTURA	**10-20 °C**
RISCALDAMENTO A BASSA TEMPERATURA	**20-30 °C**
TELERISCALDAMENTO, ACQUA CALDA SANITARIA E RISCALDAMENTO DI SERRE AGRICOLE	**30-50 °C**
ESSICCAZIONE DEI CEREALI, INDUSTRIA A BASSA TEMPERATURA, RAFFREDDAMENTO EDIFICI E DESALINIZZAZIONE ACQUE MARINE	**50-70 °C**
INDUSTRIA AD ALTA TEMPERATURA E PRODUZIONE DI VAPORE	**80-110 °C**

Le diverse applicazioni del calore di scarto dipendono dalla temperatura a cui esso si trova. Elaborazione propria su dati Ashraf et al., 2026.

Il **WHR** rappresenta quindi una soluzione per la mitigazione dell'impatto ambientale dei data center. Diversi studi hanno dimostrato come il calore di scarto possa trovare molteplici applicazioni (Yuan et al., 2023), che variano in funzione della tipologia di raffreddamento adottata e della temperatura a cui il calore si trova (Wang et al., 2025). A seconda degli intervalli di temperatura corrispondono diverse modalità di riutilizzo (Ashraf et al., 2026).

Una delle applicazioni più promettenti del calore di scarto è appunto l'impiego nelle **reti di teleriscaldamento urbano** (*District Heating*, **DH**), già ampiamente diffuso nel nord Europa, ma relativamente limitato nel sud e nell'est Europa (Yuan et al., 2025). Il teleriscaldamento è un sistema di distribuzione termica del calore le cui origini risalgono al 1877, con il primo impianto a New York. Mentre la prima generazione impiegava vapore prodotto da una caldaia centralizzata a combustibili fossili, i sistemi di nuova generazione si sono evoluti integrando molteplici fonti energetiche e soluzioni di stoccaggio termico, tra cui il recupero del calore di scarto prodotto dai data center (IEA, 2025). Il calore prelevato dai sistemi di raffreddamento viene trasportato sotto forma di vapore o acqua calda, attraverso tubature interrate, agli edifici commerciali e residenziali (IEA, 2025). La temperatura del fluido dipende strettamente dalla distanza di trasporto, poiché gli edifici più lontani richiedono temperature più elevate per compensare la dispersione termica lungo il tragitto (Wang et al., 2025). Nei casi in cui il calore sia disponibile a basse temperature, come accade tipicamente nei data center con raffreddamento ad aria, vengono impiegate **pompe di calore** per innalzare il livello termico fino alle soglie operative richieste dalla rete (Huang et al., 2020). L'integrazione dei data center nelle reti di teleriscaldamento urbano rappresenta pertanto una delle strategie più efficaci per il recupero dei flussi termici che altrimenti andrebbero dispersi nell'ambiente, costituendo un elemento chiave per la transizione energetica e consentendo una significativa riduzione delle emissioni di CO_2 e dell'inquinamento atmosferico (IEA, 2025). Parallelamente al teleriscaldamento invernale, il calore di scarto può essere impiegato nei mesi estivi per il **teleraffreddamento urbano** (*District cooling*, **DC**) e per il raffreddamento degli edifici. In entrambi i casi, il calore recuperato viene utilizzato per azionare un refrigeratore ad assorbimento, che avvia un ciclo frigorifero producendo acqua refrigerata (Haywood et al., 2012). Tali sistemi richiedono temperature del calore di scarto comprese tra i 70 e i 90°C (Ebrahimi et al., 2014). In alternativa, i refrigeratori ad adsorbimento, operano a temperature inferiori, tra 50 e i 60°C (Pan et al., 2021). Un'applicazione particolarmente interessante dal punto di vista dell'economia circolare è l'impiego del calore di scarto per il **raffreddamento della sala server stessa**: il calore generato dai server viene catturato e reimpiegato come sorgente termica per azionare il chiller, riducendo la dipendenza dai sistemi di raffreddamento tradizionali a compressione. Questo approccio migliora in modo significativo l'efficienza energetica dell'impianto, incrementando l'*Energy Reuse Factor* (ERF) e riducendo i consumi elettrici complessivi (Haywood et al., 2012).

Ulteriori applicazioni si trovano in ambito industriale che, a differenza del teleriscaldamento o del riscaldamento locale, richiede calore costante per tutto l'anno (Wang et al., 2025). In campo industriale il calore di scarto viene utilizzato nelle operazioni di **desalinizzazione delle acque marine**. Questo processo, per una migliore efficienza nella desalinizzazione, richiede una temperatura del calore stabile a 50°C (Sondur et al., 2018). Il dispendio energetico derivante da questo processo industriale è elevato ma necessario per affrontare la crescente crisi idrica globale (Elsaid et al., 2020).

3.3 IL CALORE DI SCARTO IN AGRICOLTURA

Tra tutte le applicazioni, uno dei casi più importanti da tenere in considerazione in vista della proposta progettuale è l'utilizzo del calore di scarto in **ambito agricolo**. In questo contesto, il calore di scarto recuperato deve avere una temperatura costante compresa tra i 30-45°C. Inoltre, poiché i data center prevedono un funzionamento ininterrotto durante tutto l'anno, questi possono essere considerati come una fonte di calore continua e stabile nel tempo (Lin et al., 2022).

Uno degli impieghi più diffusi, in particolare nelle regioni caratterizzate da stagioni fredde, è il **riscaldamento delle serre** (*greenhouses*). In questi contesti, l'utilizzo del calore di scarto consente di estendere il periodo di coltivazione anche nei mesi più avversi, permettendo la crescita di una varietà più ampia di prodotti (Terenius et al., 2022). Un esempio è riportato nello studio di Ljungqvist et al. (2021) in cui, in Svezia settentrionale, il calore di scarto di un data center è stato impiegato per riscaldare serre di 10.000 m^2 di superficie, consentendo la produzione di 880 tonnellate di pomodori in un anno. Recenti studi hanno inoltre dimostrato come il calore di scarto recuperato possa essere impiegato nella strategia più innovativa del **vertical farming**, in cui le piante vengono disposte in strati sovrapposti (Gumisiriza et al., 2022).

Il calore di scarto può essere impiegato anche nei processi di **essiccazione di alcuni prodotti agricoli**: cereali, foraggio per il bestiame, granaglie e semi come mais e orzo, frutta, foglie di tè, pellet o alghe per la produzione di biocarburanti (Terenius et al., 2022). Un'ulteriore applicazione riguarda la produzione del caffè: in questo caso è necessario che la temperatura non superi i 45°C, al fine di preservarne l'aroma. Solitamente il processo di disidratazione dei chicchi di caffè avviene mediante motori a combustibili fossili e, per questo motivo, l'impiego del calore di scarto proveniente dai data center potrebbe rappresentare una valida alternativa (Terenius et al., 2022).

Infine, il calore di scarto recuperato può essere utilizzato anche nell'**allevamento zootecnico**, dove le stalle vengono climatizzate al fine di mantenere, anche nei mesi invernali, una temperatura costante, migliorando di conseguenza la produttività del bestiame (Mihailova et al. 2022).

Qual è il vero risparmio nell'utilizzo del calore di scarto?

-36%

RIDUZIONE DEL FABBISOGNO ENERGETICO NEI PROCESSI DI ESSICCAZIONE

3.3.1
Essiccazione dei cereali

Come accennato in precedenza, il calore di scarto prodotto dai server rappresenta un'applicazione strategica dell'**economia circolare** e può essere impiegato nel processo di essiccazione dei cereali e di altri prodotti agricoli. L'aria calda in uscita dai server, anziché essere dispersa verso l'esterno, può infatti diventare una risorsa importante per la conservazione alimentare. Tra i prodotti agricoli interessati figurano in particolare i **cereali** e i **foraggi** (Terenius et al., 2022).

Nello specifico, il calore in uscita dal data center viene immesso in magazzini o ambienti appositamente predisposti nei quali avviene il processo di essiccazione. Nel caso dei cereali e foraggi, la temperatura deve attestarsi generalmente intorno ai **50 e 70°C** (Chen et al., 2024). Come illustrato nel paragrafo 3.3.2.1, il calore estratto dai server può presentare temperature differenti a seconda del sistema di raffreddamento adottato nel data center (Wang et al., 2025). In particolare, l'aria prelevata dai corridoi della sala server è caratterizzata da temperature relativamente basse e per ovviare a questo limite, è necessario ricorrere all'utilizzo della pompa di calore al fine di raggiungere la temperatura richiesta. Nel caso invece del raffreddamento per immersione dei server in un liquido dielettrico, il calore prelevato è caratterizzato da temperature molto più elevate, motivo per il quale è considerato ad alto potenziale di recupero, consentendo il suo utilizzo diretto e massimizzando il recupero energetico (Yuan et al., 2023).

Il calore di scarto dei data center si pone quindi come valido sostituto ai combustibili fossili nel processo industriale di essiccazione dei prodotti alimentari, costituendo un notevole risparmio energetico (Terenius et al., 2022). In particolare, uno studio ha dimostrato come l'integrazione di questo sistema sia in grado di ridurre il **fabbisogno energetico agricolo del 36%** per i processi di disidratazione (Chen et al, 2024), limitando anche eventuali perdite post-raccolto e consentendo agli agricoltori di essiccare i propri prodotti in modo più efficiente (Terenius et al., 2022). Questa nuova tecnologia comporta inoltre un vantaggio in termini di sicurezza alimentare: l'essiccazione, avvenendo in ambienti sterili ed isolati, protegge gli alimenti da parassiti, roditori ed eventi atmosferici, garantendo una migliore conservazione delle proprietà organolettiche del prodotto (Terenius et al., 2022).

3.3.2
Vertical hydroponic farming

-92%

RIDUZIONE DEL FABBISOGNO IDRICO NELLE VERTICAL FARM RISPETTO ALL'AGRICOLTURA TRADIZIONALE

-36,6%

RIDUZIONE DEL CONSUMO DI ELETTRCITÀ RISPETTO AD UN SISTEMA DI CLIMATIZZAZIONE TRADIZIONALE A COMBUSTIBILI FOSSILI

Una delle tecniche più innovative di coltivazione agricola è la **vertical hydroponic farming**, che avviene in ambiente interno e in cui le piante vengono disposte in strati sovrapposti verticalmente, così da massimizzare la produzione per unità di superficie. Si tratta di una coltivazione di tipo idroponico: le piante crescono in assenza di terreno e le loro radici vengono immerse in una soluzione acquosa ricca di nutrienti (Gumisiriza et al., 2022).

Questa metodologia consente un elevato risparmio idrico: la produzione idroponica richiede solamente l'**8% dell'acqua necessaria all'agricoltura tradizionale** (Wang & Iddio, 2022). Tale risparmio deriva dal sistema di coltivazione stesso e dall'ambiente in cui si trova: le perdite idriche per evaporazione e drenaggio del terreno sono ridotte al minimo (Borland et al., 2023). Il ciclo idroponico è inoltre un sistema a circuito chiuso, in cui la soluzione acquosa arricchita di nutrienti viene riutilizzata, garantendo una massima efficienza nel processo (Engler & Krarti, 2022). La coltivazione idroponica permette inoltre una maggiore diversificazione delle colture e una resa produttiva più elevata: alcuni studi hanno dimostrato come una vertical farm possa produrre mediamente 7,23 kg/m^3 di prodotti alimentari all'anno, valore nettamente superiore rispetto ai 2,71 kg/m^3 ottenibili in campo aperto (Borland et al., 2023). Un ulteriore elemento significativo è la riduzione del rischio fitosanitario: la coltivazione in ambiente interno previene l'attacco di parassiti e quindi è possibile non ricorrere all'utilizzo di fertilizzanti e pesticidi (Borland et al., 2023).

Tuttavia, il limite principale delle vertical farm è l'elevato consumo di energia elettrica. Il fabbisogno energetico dipende principalmente dall'**illuminazione artificiale a LED** e dal controllo climatico, con sistemi di riscaldamento e ventilazione. In particolare, l'illuminazione a LED rappresenta tra il 55,2 e il 66% dell'energia totale consumata (Borland et al., 2023). La scelta dell'illuminazione artificiale è motivata dall'obiettivo di massimizzare la produttività agricola, in quanto consente di regolare con precisione l'intensità della luce e lo spettro luminoso per ottimizzare la crescita delle piante (Borland et al., 2023). Per quanto riguarda il controllo climatico, le vertical farm richiedono delle temperature costanti che si attestano generalmente intorno ai 20 e 30°C, in funzione della tipologia di prodotto che viene coltivata (Borland et al., 2023). Un esempio concreto è il *China Brain Green Data Center*, in cui la temperatura viene mantenuta intorno ai 25°C per favorire la crescita di foraggi e piante (Chen et al., 2024), ma per altre tipologie di colture, come basilico e lattuga, le temperature si attestano intorno ai 25 e 30°C, mentre per le fragole tra i 23 e i 28°C (Barickman et al., 2021). Il sistema di climatizzazione rappresenta pertanto il secondo principale consumatore di energia nelle vertical farm, con un fabbisogno energetico totale del 18 e 23% in climi temperati (Borland et al., 2023).

Per fronteggiare questi limiti, per il sistema d'illuminazione è possibile privilegiare la **luce solare naturale**. La produttività risulta in questo caso poco inferiore, ma il risparmio energetico è significativo: l'energia consumata per unità di prodotto si riduce all'86%, passando da 38,8 kWh/kg con l'illuminazione a LED a 5,4 kWh/kg con la luce solare (Borland et al., 2023). Per sfruttare la luce naturale, le vertical farm non possono essere concepite come ambienti chiusi, ma devono adottare tipologie costruttive diverse, come le serre Venlo: strutture in vetro con coperture a falde multiple, caratterizzate da un'elevata trasmittanza luminosa e da un efficace sistema di ventilazione e sigillatura (Du et al, 2024).

Per quanto riguarda invece il consumo energetico legato al riscaldamento, è possibile ricorrere al **calore di scarto prodotto dai server del data center**. Questa soluzione rappresenta una sinergia in cui il prodotto di scarto del data center può diventare una risorsa energetica importante per la coltivazione agricola (Borland et al., 2023).

In questo caso si configurano due scenari distinti: Il primo è il sistema integrato ad aria diretta, in cui il calore di scarto viene immesso direttamente nella vertical farm. L'**aria calda favorisce la traspirazione delle piante** e, al termine del ciclo, **viene filtrata e reimmessa nel data center** per contribuire al raffreddamento dei server. Questo scenario presenta però alcune criticità: nonostante la filtrazione, l'aria proveniente dalla coltivazione può contenere agenti patogeni, spore e residui organici che potrebbero danneggiare i componenti dei server (Borland et al., 2023).

Il secondo è il sistema di scambio di calore, in cui data center e vertical farm sono edifici separati ma adiacenti. Il calore di scarto viene quindi trasferito tramite scambiatori di calore, senza che l'aria dei server e quella della vertical farm entrino mai in contatto (Zhang et al., 2022). Questo sistema elimina i rischi biologici e ambientali legati alla contaminazione, risultando significativamente più sicuro. A fronte di questa maggior sicurezza, si registra tuttavia una perdita termica nel processo di scambio (Borland et al. 2023).

L'utilizzo del calore di scarto costituisce un esempio concreto di **simbiosi industriale**, poiché il calore riscalda l'ambiente interno delle vertical farm, mentre le piante, attraverso il processo di traspirazione, assorbono il calore e rilasciano umidità, in modo tale da raffreddare l'aria fino a temperature di circa 15,2°C, ottimali per il funzionamento dei sistemi di condizionamento del data center (Borland et al., 2023). Come accennato già in precedenza, dato che l'ambiente interno della vertical farm richiede una temperatura compresa tra i 20 e i 30°C (Borland et al., 2023), qualora la temperatura del calore di scarto risultasse insufficiente, è necessario ricorrere a pompe di calore per innalzarla fino al valore richiesto (Chen et al., 2024). Qualora fosse invece eccessiva, il calore viene miscelato con aria esterna più fredda al fine di raggiungere le condizioni climatiche ottimali per la coltivazione (Borland et al., 2023).

Il recupero calore di scarto consente una riduzione del **36,6% del consumo di elettricità** rispetto a un sistema di climatizzazione tradizionale alimentato dalla rete elettrica o da combustibili fossili (Borland et al., 2023). Combinando queste due soluzioni, ovvero l'utilizzo della luce solare e l'impiego del calore di scarto, il fabbisogno energetico complessivo si riduce notevolmente: il consumo riguarderebbe esclusivamente i sistemi di irrigazione, fertirrigazione, automazione e deumidificazione (Borland et al., 2023).

4. CASELLE TORINESE E IL SUO INTORNO

4.1 DALLE CENTURIE ALLE INFRASTRUTTURE

4.2 L’ESISTENTE

4.3 I LIMITI AEROPORTUALI

4.4 QUANTO PESA UN DATO?

4.5 LA MISURA DEL VISIBILE

4.6 LA MISURA DELL’INVISIBILE

EPOCA ROMANA

Caselle Torinese nacque come piccola comunità durante l'epoca romana. Uno degli elementi più rilevanti è la cosiddetta **centuriazione di Caselle**: un sistema di suddivisione del territorio basato su una griglia di linee ortogonali, decumani e cardini, che consentiva una precisa distribuzione delle terre da coltivare. La centuriazione si estendeva da Valperga fino a Torino e l'orientamento seguiva una direzione da nord a sud. Le opere di centuriazione comportavano interventi di bonifica e disboscamento, con la realizzazione di canalizzazioni per l'uso agricolo. La trama di questa centuriazione è tuttora leggibile in alcune zone rurali del comune e ne costituisce la base planimetrica dell'attuale aeroporto (Cresci Marrone et al., 1998).

CENTURIAZIONE DI CASELLE



I campi agricoli, allineati con la pista dell'aeroporto, mostrano ancora i tratti della centuriazione romana. Ortofoto scala 1:50.000, Google Satellite, 2026

XII-XIV SECOLO

SAVOIA

Le prime testimonianze documentarie risalgono al XII secolo, con la presenza di diverse chiese. Tuttavia, il periodo medievale è segnato dalla rivalità tra Savoia e Monferrato, in cui il dominio per il territorio si alterna tra le due casate. Solo nel 1330 la situazione si stabilizza, grazie alla dote che Teodoro di Monferrato concesse alla figlia Violante, che includeva il comune di Caselle in occasione del matrimonio con Aimone di Savoia. Da quel momento il territorio passò definitivamente sotto il dominio sabaudo.
Il fulcro centrale di questo periodo è l'**acqua**: la **Stura di Lanzo** e i relativi **canali** e **bealere** costituivano la risorsa principale del territorio, infatti già nel XIV secolo il comune era attivamente coinvolto in liti per il controllo delle acque con i signori di Leinì (Provero, 1998).

XVI SECOLO

ECONOMIA FIORENTE

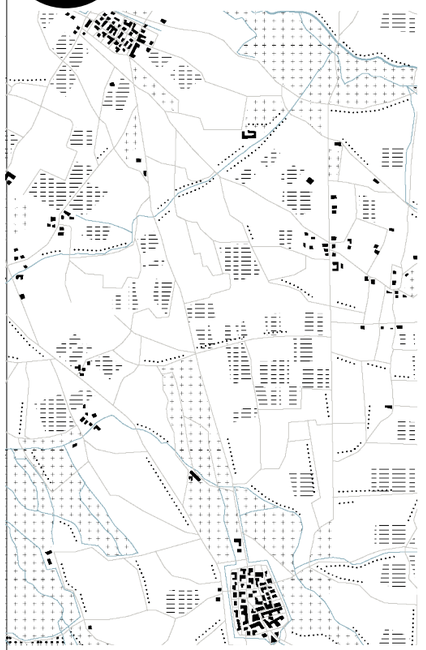
In questo secolo Caselle venne colpita dalla peste con un'epidemia particolarmente grave nel 1564, ma l'economia continuava a crescere grazie alle attività industriali legate alla presenza dei due **canali** principali, Sinibaldi e Molini, che fornivano energia ai numerosi battitoi impegnati nella produzione di carta e canapa (Rigodanza, 2024).

XVIII SECOLO

BATTAGLIA DI TORINO

Nel 1705 le truppe francesi occuparono Caselle, ma già nel 1706 vennero cacciate a seguito della Battaglia di Torino, che pose fine all'assedio e liberò il Piemonte dal dominio francese. In questa battaglia contribuì anche Caselle, inviando soldati e materiale bellico (Rigodanza, 2024).

1852



Elaborazione propria su base cartografica storica, Carta degli Stati Sabaudi, 1852, Provincia di Torino

1868

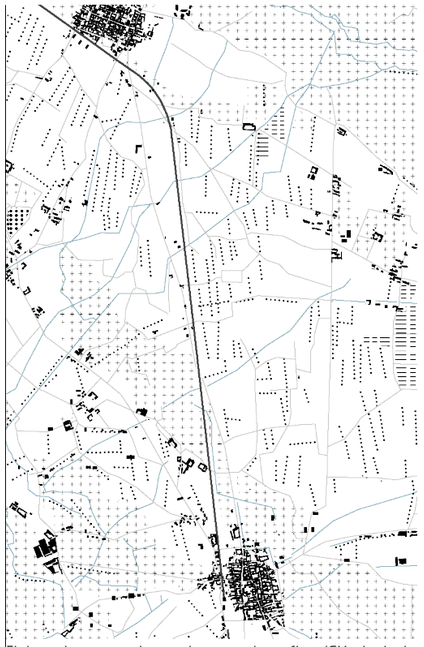
STAZIONE FERROVIARIA



Stazione di Caselle vista dalla piazza antistante, Colombatto, 2022 (immagine s.d., senza autore)

La **stazione ferroviaria** nacque nel 1868. Inizialmente doveva sorgere a est del paese, nell'area dove oggi si trova l'aeroporto, ma venne poi spostata nell'attuale Piazza Matteotti e nel 1868 venne inaugurato il tratto Venaria-Caselle (Colombatto, 2022).

4.1 DALLE CENTURIE ALLE INFRASTRUTTURE



Elaborazione propria su base cartografica IGM, impianto storico 1922-1939, Provincia di Torino

1922 - 1939

1937 - 1945

AEROPORTO MILITARE

L'aeroporto, situato tra i comuni di Caselle, San Maurizio Canavese e San Francesco al Campo, nasce nel 1937 come **campo volo militare.** Dopo l'armistizio venne però occupato dalle truppe tedesche, che lo bombardarono ripetutamente per impedire l'atterraggio degli aerei alleati. Nel 1944, durante la ritirata delle truppe tedesche, venne completamente abbattuto così da renderlo inutilizzabile (Colombatto, 2019).



Vista aerea della pista in costruzione. Nei campi circostanti sono ancora leggibili le tracce della centuriazione romana.
Moiso, Archivio Storico della Città di Torino, FT 11A01_010, primi anni '50.

1953

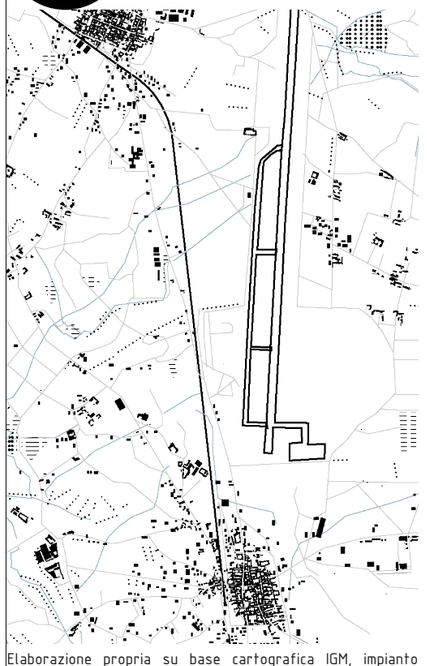
AEROPORTO CIVILE

Venne **inaugurato il nuovo aeroporto**, all'epoca nominato "Città di Torino" e successivamente "Sandro Pertini", diventando il principale per uso civile (Museo Torino, 2024).



Vista aerea della pista e i campi agricoli. Archivio Storico della Città di Torino, FT 11A02_025, metà anni '50.

1955 - 1969



Elaborazione propria su base cartografica IGM, impianto storico 1955-1969, Provincia di Torino

DOMANI

DATA CENTER

Il Piano Particolareggiato del 2024 approvato dal Comune di Caselle, prevede la realizzazione di un **polo tecnologico** con data center e industrie hi-tech (SMAPROGETTI, 2024).

AMPLIAMENTO AEROPORTO

Nel 2026 ENAC ha approvato il Masterplan al 2032 per l'Aeroporto Sandro Pertini. Il piano prevede un investimento per lo sviluppo e la modernizzazione dello scalo. Vengono definiti una serie di interventi come l'**ampliamento del terminal**, il **potenziamento delle infrastrutture di volo** e la **riqualificazione di alcuni spazi**. Non è prevista l'introduzione di una nuova pista di volo (ENAC/SAGAT, 2026).

- Insediamento
- Strade
- Idrografia
- Linea ferroviaria
- Aeroporto
- Aree boscate
- Filari
- Aree a prato
- Campi agricoli

4.2 L'ESISTENTE

4.2.1
Lo sguardo d'insieme



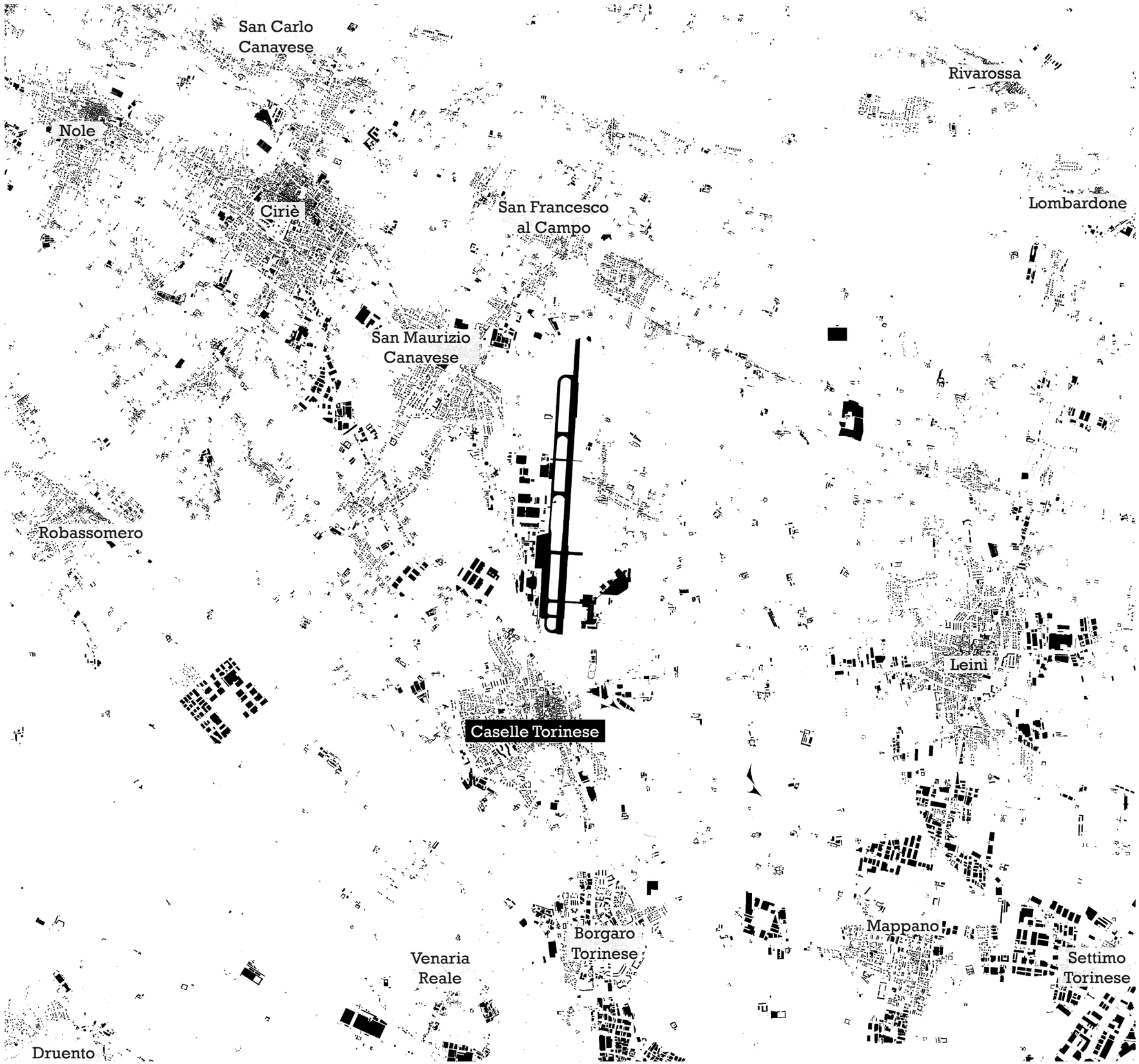






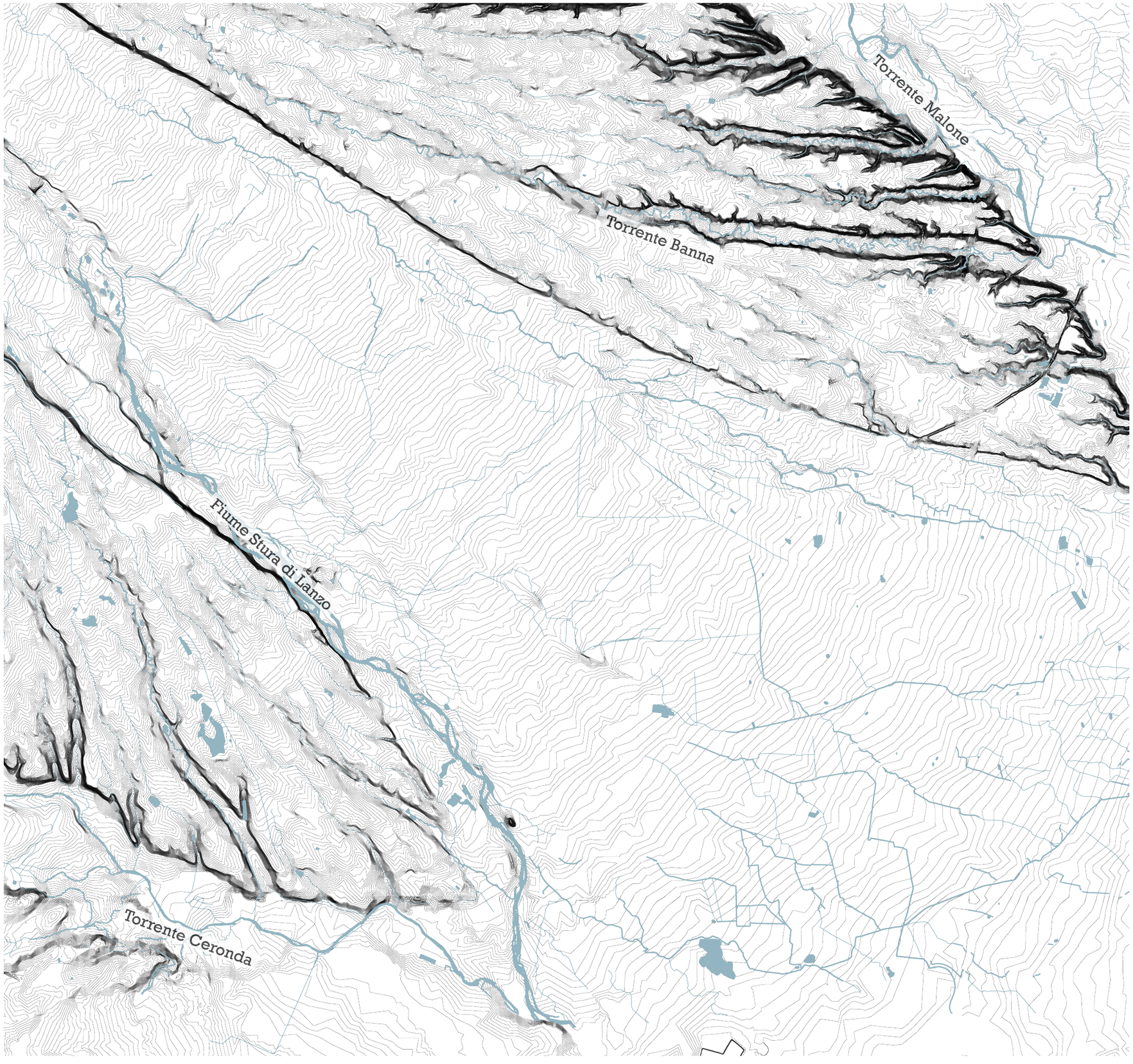
Ortofoto scala 1:50.000, Caselle Torinese e San Maurizio Canavese, Google Satellite, 2026

4.2.1.1
Insediamento antropico



Fonte: BDTRE Regione Piemonte 2025

4.2.1.2 Geomorfologia e idrografia



Bacino d'acqua
Idrografia

500 m

Fonte: INGV, Open Street Map, BDTRE
Regione Piemonte 2025

4.2.2
Lo sguardo ravvicinato

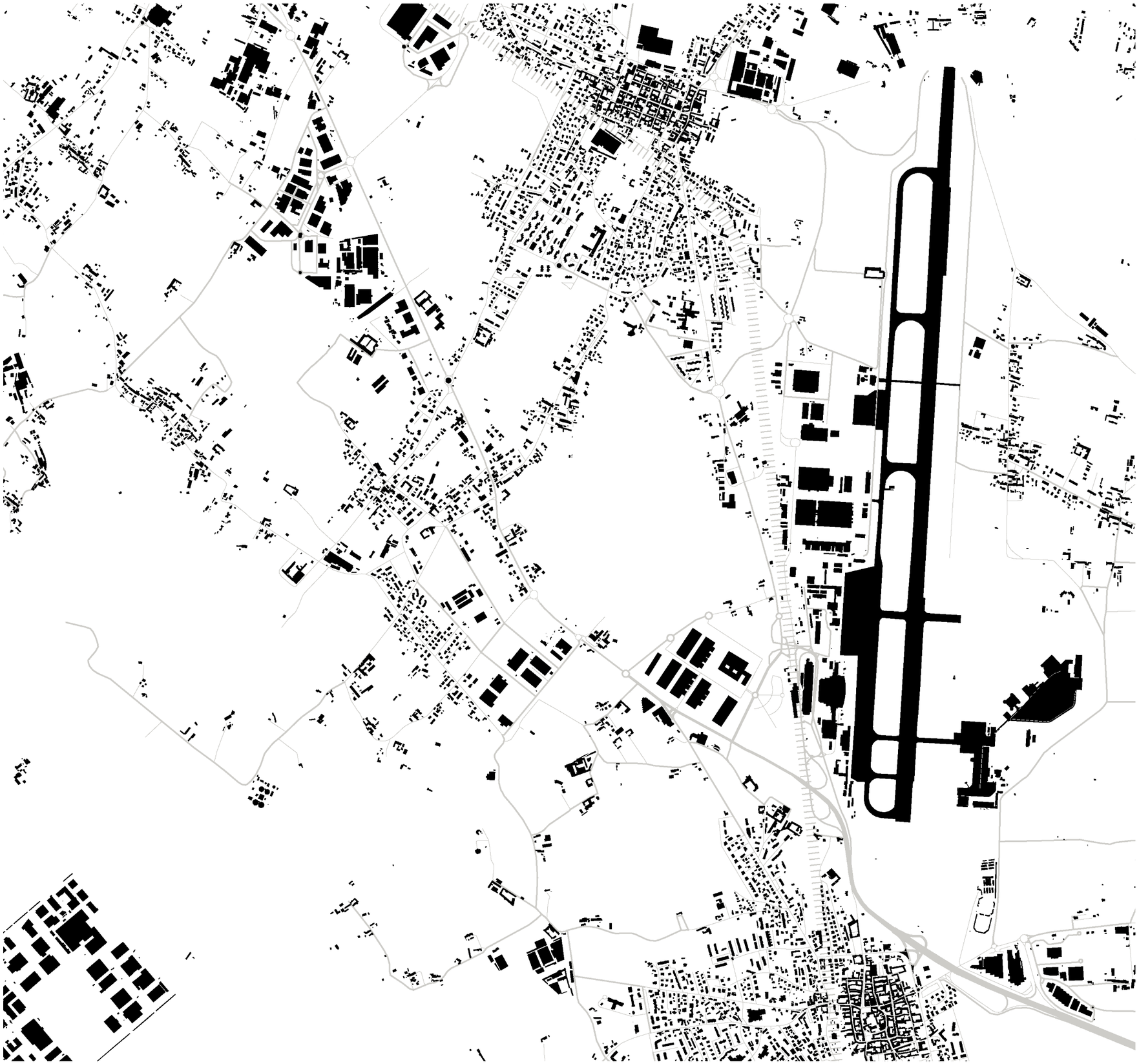


4.1 Area in cui sorgerà il data center, Caselle Torinese, 2026. Foto dell'autrice



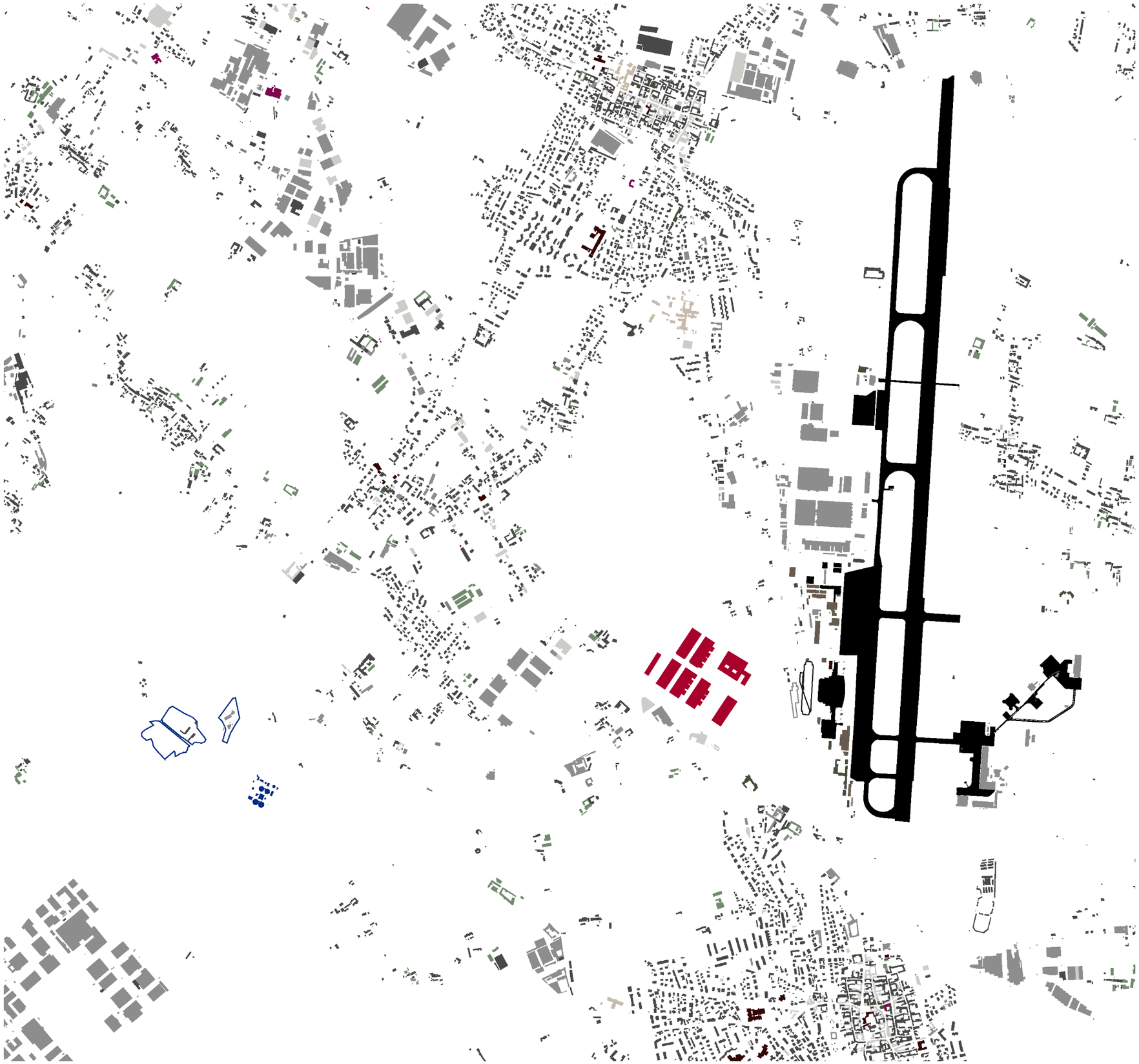
4.2 Area limitrofa all'aeroporto, San Maurizio Canavese, 2026. Foto dell'autrice

4.2.2.1 Insediamento e infrastrutture



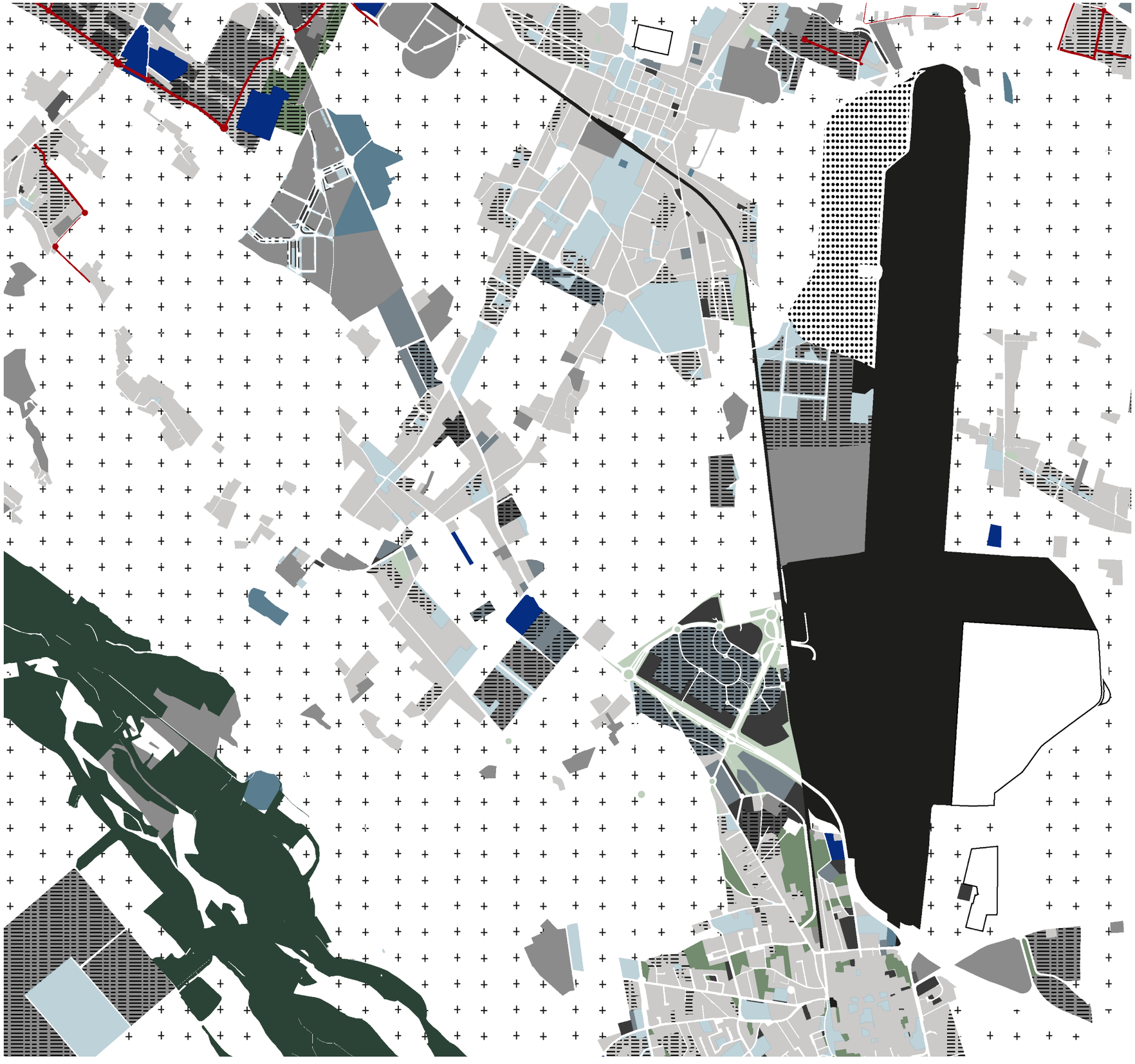
Fonte: BDTRE Regione Piemonte 2025

4.2.2.2
Tipologia edificato



Fonte: BDTRE Regione Piemonte 2025

4.2.2.3
Piano Regolatore Generale



Viabilità
- Viabilità in progetto

Trasformazioni in atto
- Area in trasformazione

Trasformazioni a lungo termine
- Ampliamento aeroportuale

Sistema del verde
- Area boscata
- Area verde urbana
- Verde infrastrutturale

Destinazioni d'uso
- Residenziale
- Produttivo
- Terziario
- Polifunzionale
- Agricolo

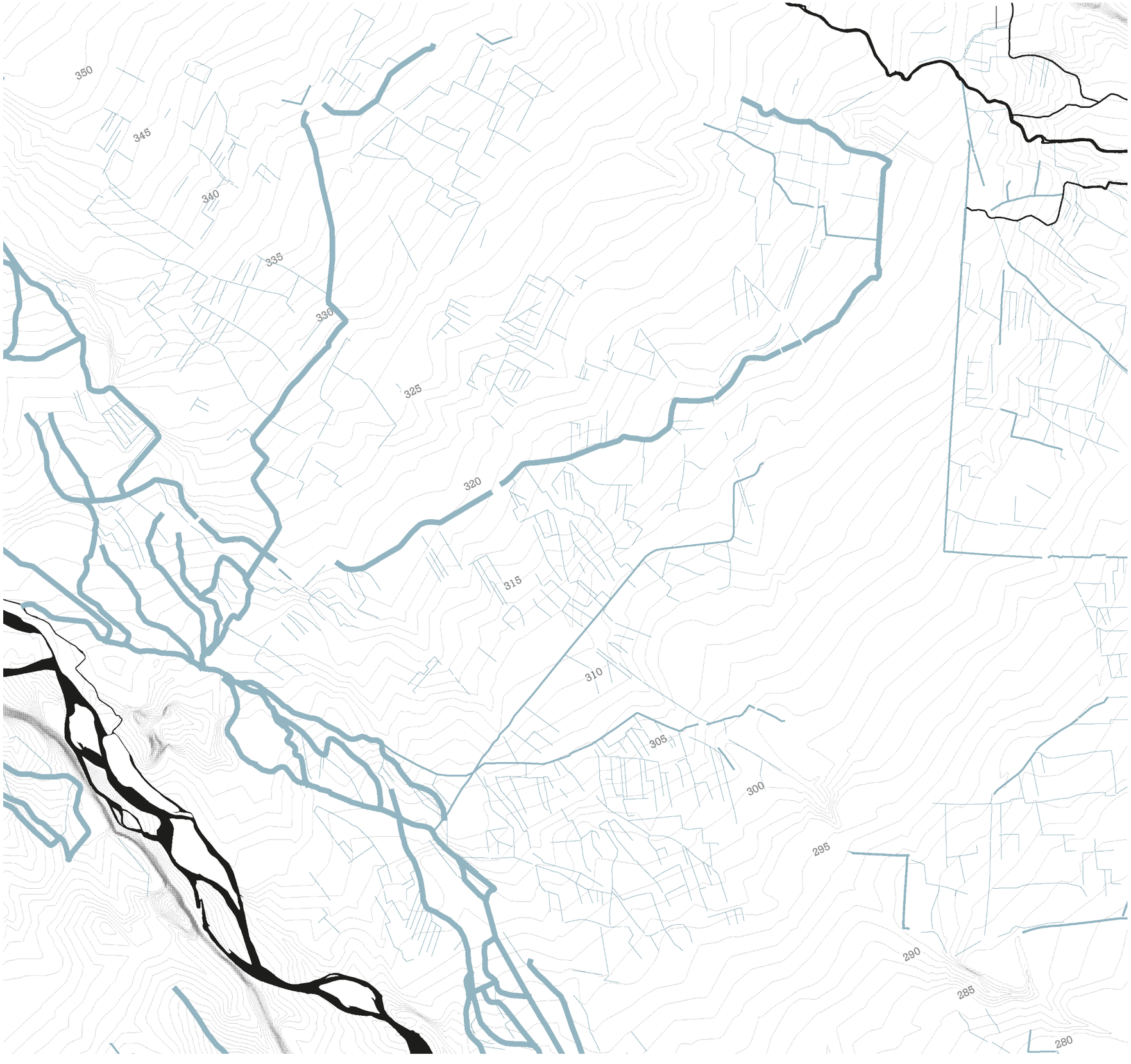
Infrastrutture e impianti
- Infrastruttura aeroportuale
- Infrastruttura ferroviaria
- Impianti tecnologici e a rete
- Altri impianti

Servizi
- Area sportiva
- Parcheggio pubblico
- Altro

500 m

Fonte: Mosaico dei PRGC della Città Metropolitana di Torino 2026

4.2.2.4
Idrografia



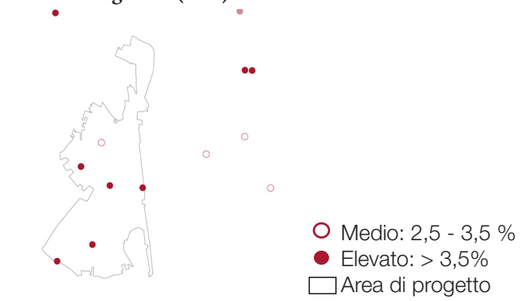
Acque artificiali
Gora
Canale
Scoline
Acque naturali
Fiume
Torrente
Rio

500 m

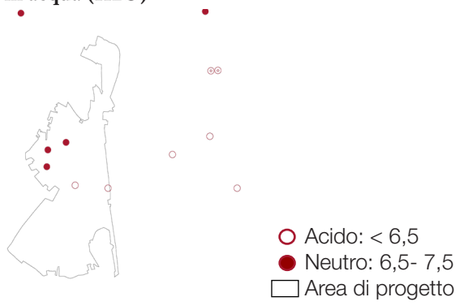
Fonte: Open Street Map, BDTRE Regione Piemonte 2025

4.2.2.5
Suolo

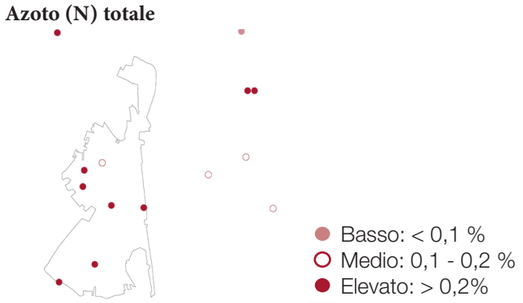
Sostanza organica (S.O.)



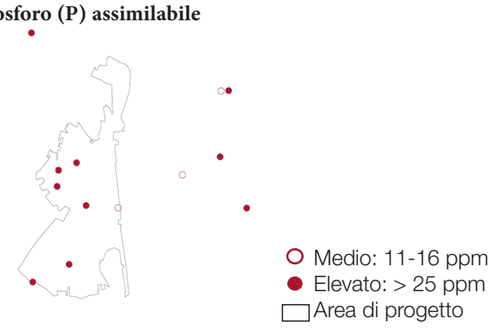
pH in acqua (H2O)



Azoto (N) totale



Fosforo (P) assimilabile



Rapporto Carbonio/Azoto (C/N)



Fonte: Atlante delle Analisi dei Terreni

TIPOLOGIA TESSITURALE

Il suolo è classificato dalla Carta dei suoli 1:50000 della Regione Piemonte come franco-sabbioso, la cui composizione tessiturale corrisponde a 70-85% di sabbia, 10-15% di limo e il 5-15% di argilla. Questa tipologia tessiturale determina un suolo ben drenante e facilmente lavorabile.

ANALISI CHIMICA DEL SUOLO

Sostanza organica (S.O.)
La sostanza organica definisce il grado di **fertilità del suolo**, svolgendo un ruolo fondamentale nella nutrizione delle piante (Regione Campania, s.d.).

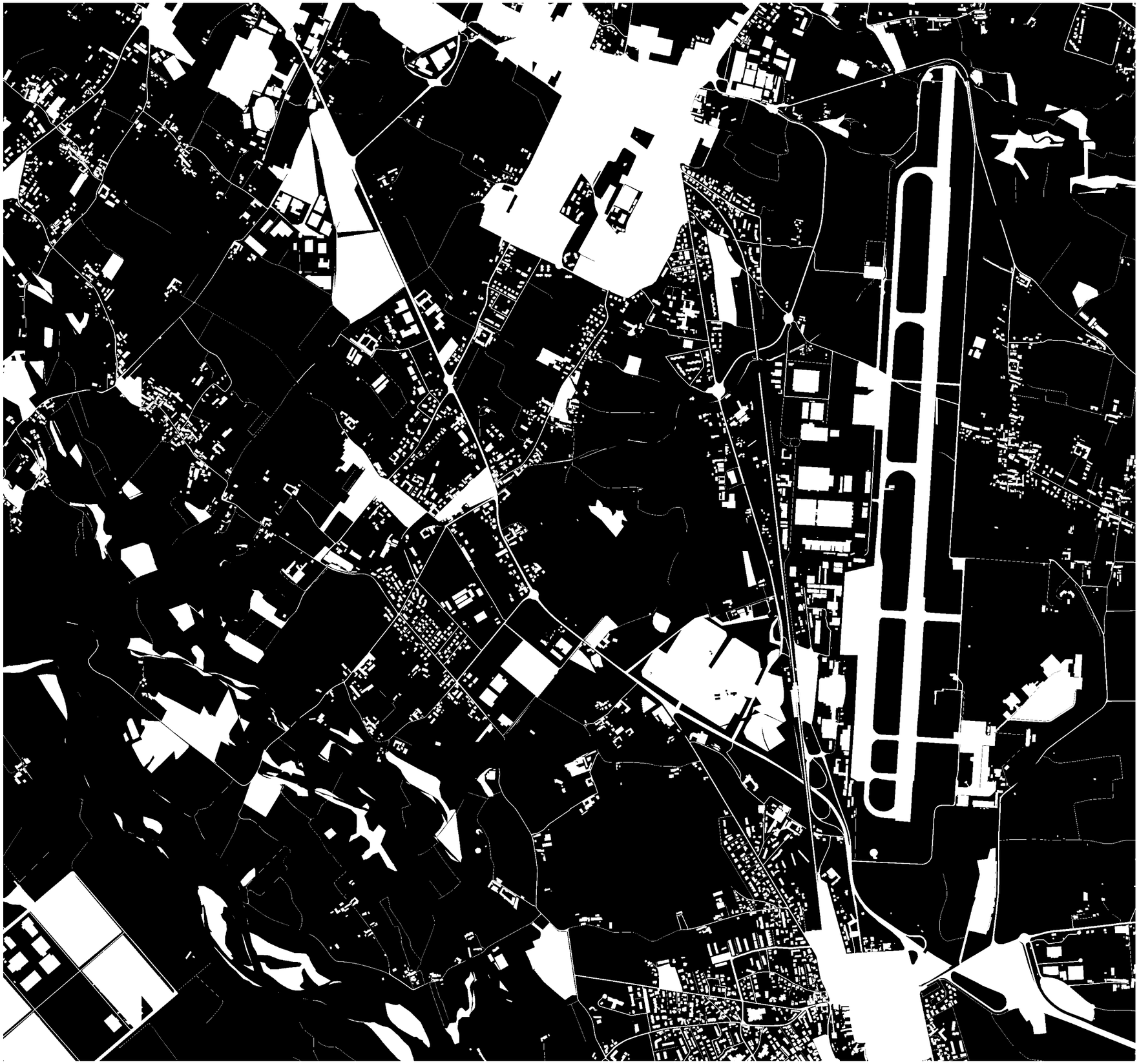
pH in acqua (H_2O)
Il pH H_2O definisce la **disponibilità degli elementi nutritivi** per le piante, la condizione ottimale è quella neutra. Viene determinato sciogliendo il terreno in acqua con un rapporto di 1:2,5 (Marzadori & Ciavatta, 2011).

Azoto (N) totale
L'azoto è uno dei principali **elementi nutritivi assorbiti dalle piante**, essenziale per la sintesi di proteine, enzimi e clorofilla (Masoni & Ercoli, 2010).

Fosforo (P) assimilabile
Il fosforo (P) presente nel suolo svolge un ruolo fondamentale nella **nutrizione delle piante**, per i processi energetici e lo sviluppo radicale (Società Italiana della Scienza del Suolo, n.d.).

Rapporto Carbonio/Azoto (C/N)
Il rapporto C/N definisce la **qualità della sostanza organica** e la sua attitudine alla mineralizzazione. Valori compresi tra 9 e 12 indicano una sostanza organica ben umificata, in equilibrio (IPLA, 2018).

4.2.2.6
Permeabilità e impermeabilità

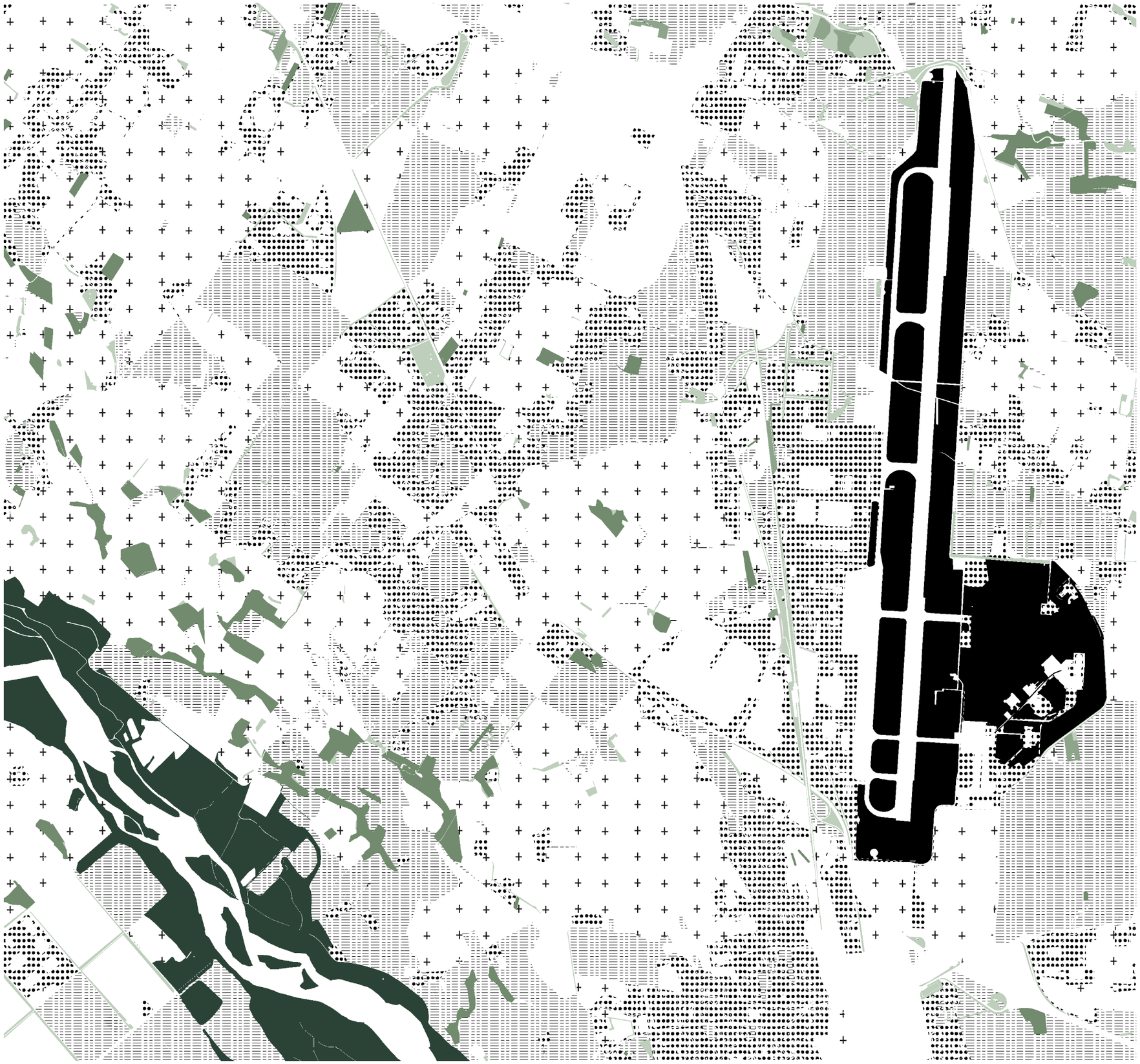


Superficie permeabile
Superficie impermeabile

500 m

Fonte: Land Cover Piemonte, Carta degli Habitat

4.2.2.7
Vegetazione



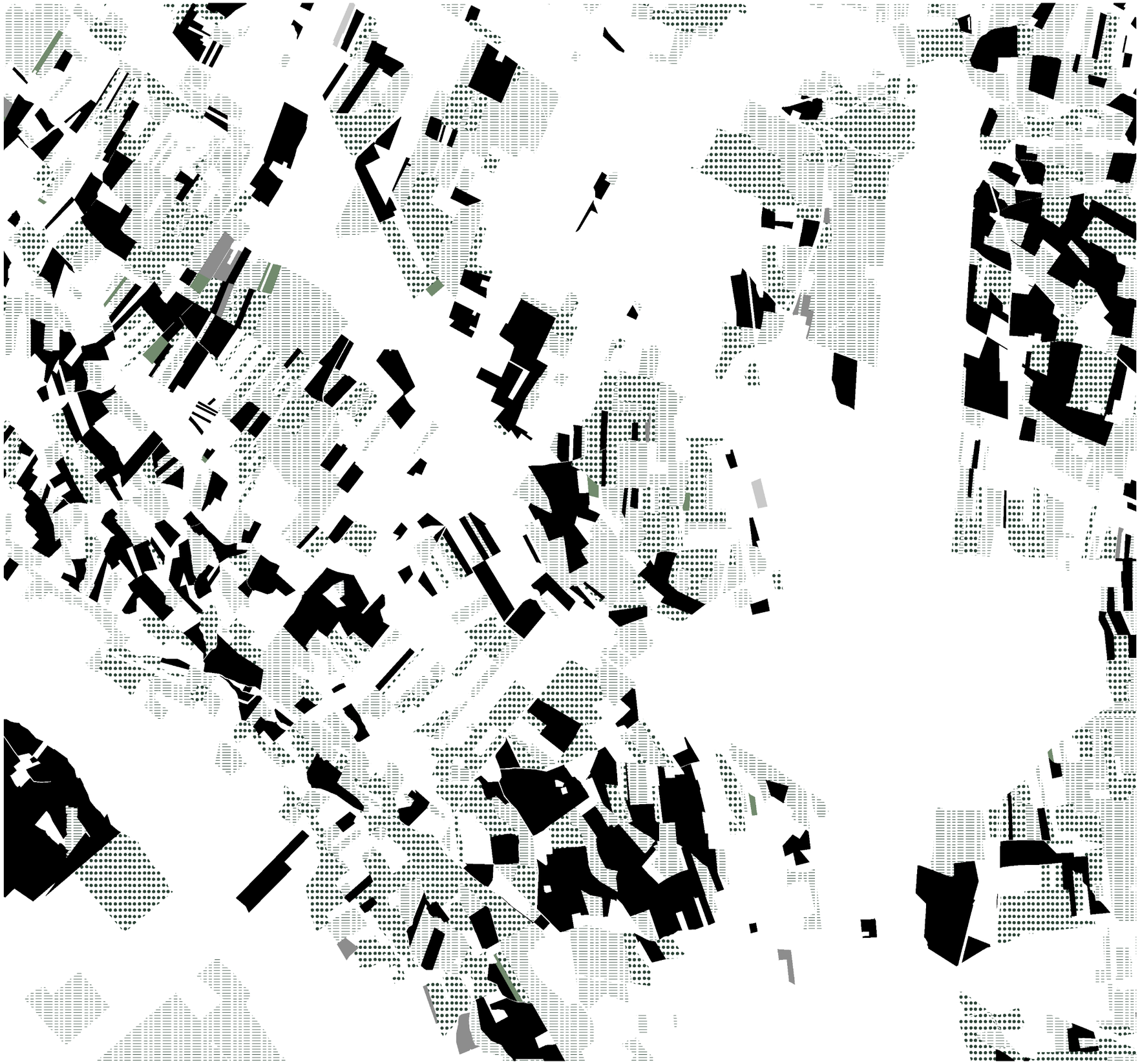
Antropica
- Prato aeroportuale
- Prato stabile da sfalcio
- Campo agricolo
- Parchi e giardini

Naturale e seminaturale
- Vegetazione ripariale
- Vegetazione arborea
- Vegetazione arbustiva
- Incolto e prateria

500 m

Fonte: Land Cover Piemonte, Carta degli Habitat, BDTRE Regione Piemonte 2025

4.2.2.8
Uso del suolo agricolo

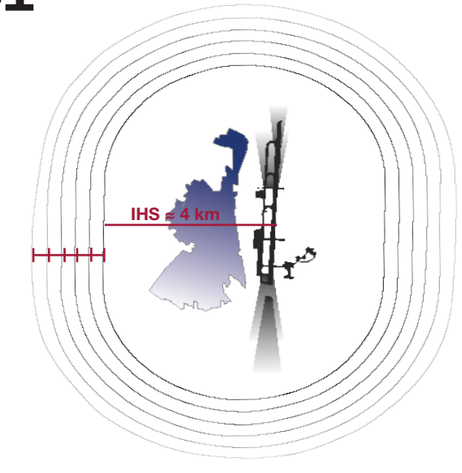


Prati
Prato stabile da sfalcio
Aree non produttive
Terreno a riposo
Seminativi
Foraggera avvicendata
Cereale
Coltura orticola
Colture arboree da frutto
Coltura arborea da frutto
Vivai
Vivaio

500 m

Fonte: Uso del Suolo Agricolo, Land Cover Piemonte, Carta degli Habitat

01



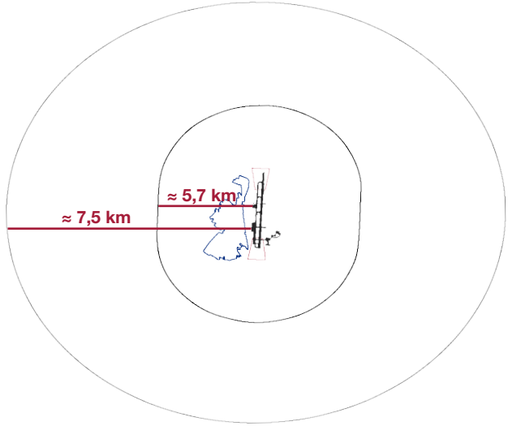
LIMITI VERTICALI DI PROGETTO
Superfici di Limitazione degli Ostacoli (OLS): Superficie Orizzontale Interna (IHS)

Le **Superfici di Limitazione degli Ostacoli** (**OLS** - *Obstacle Limitation Surfaces*) garantiscono la sicurezza del traffico aereo, limitando la presenza di ostacoli (alberi, edifici o altro), in prossimità dell'aeroporto. Nello specifico, l'area d'intervento ricade nella **Superficie Orizzontale Interna** (**IHS** - *Inner Horizontal Surface*), la quale impone un limite altimetrico costante di **329,5 m s.l.m**. Ciò comporta che, data la quota media del suolo, gli ostacoli non debbano superare un'altezza di circa 28 m, comprensiva per ogni edificio o elemento arboreo a maturità, all'interno della IHS (ENAC, Tavola PC-01, 2010).

Superficie di Avvicinamento/Decollo [m s.l.m.]
284,5 m 329,5 m
Superficie Orizzontale Interna (IHS) [m s.l.m.]
329,5 m
Quota area di progetto [m s.l.m.]
286 m 312 m
Altre superfici di limitazione [m s.l.m.]
349,5 m 369,5 m 389,5 m 409,5 m 429,5 m
Distanza tra superfici di limitazione
≈ 0,4 km
Area di progetto

Elaborazione propria su dati Planimetria Catastale ENAC PC-01

02



AREE SOGGETTE A RESTRIZIONI
Per la costruzione di discariche, ampie superfici riflettenti e distributori di carburanti

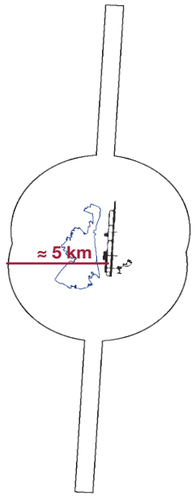
Ai fini della valutazione dell'assimibilità di interventi con superfici esterne riflettenti, deve essere presentato all'ENAC uno studio sulla riflessione della luce.
Solitamente sono soggetti a restrizione i progetti che includono **superfici vetrate o campi fotovoltaici di grandi dimensioni**, di modo da prevenire fenomeni di accecamento.
Invece per l'accettabilità di progetti che comportano una possibile fonte di attrazione per la fauna selvatica è necessario consultare le Linee guida relative alle fonti attrattive di fauna selvatica reperibili sul sito dell'ENAC (ENAC, Tavola PC-01 A, 2010).

Emissione gas
Distributori carburanti e industrie chimiche
Superfici riflettenti e illuminazione
Manufatti con superfici esterne riflettenti o campi fotovoltaici
Luci pericolose o fuorvianti
Attrazione fauna selvatica
Laghetti, bacini d'acqua, canali artificiali, aree naturali protette
Piantagioni
Allevamenti di bestiame
Area di progetto

Elaborazione propria su dati ENAC, Planimetria Catastale PC-01 A, 2010

4.3 I LIMITI AEROPORTUALI

03



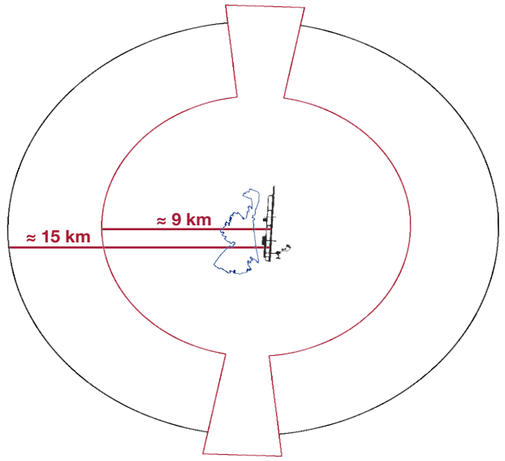
AREE SOGGETTE A RESTRIZIONE
Per l'installazione di laser e luci ad alta intensità

Aree soggette a restrizione per l'installazione di **proiettori o laser** con lo scopo di creare dei giochi di luce per intrattenimento. In questo caso vengono individuate delle aree in cui, prima di procedere con l'installazione di luci, devono essere soggette ad una valutazione di accettibilità secondo i requisiti del Regolamento per la costruzione e l'esercizio degli aeroporti, Capitolo 6, paragrafo 1.3 (ENAC, Tavola PC-01 B, 2010).

Area soggette a restrizione
Area di progetto

Dati estratti e rielaborati dalla Planimetria Catastale ENAC PC-01 B

03



AREE SOGGETTE A RESTRIZIONE
Per l'installazione di impianti eolici

Le aree soggette a restrizioni per l'installazione e la realizzazione di impianti eolici si distinguono in due tipologie: un'area d'incompatibilità assoluta e una soggetta a specifiche autorizzazioni da parte dell'ENAC prima della realizzazione (ENAC, Tavola PC-01 C, 2010).

Area di incompatibilità assoluta
Area soggetta ad autorizzazione ENAC
Area di progetto

Dati estratti e rielaborati dalla Planimetria Catastale ENAC PC-01 C

4.3.1
Bird strike

SPECIE ORNITICHE RILEVATE NEGLI IMPATTI - Aeroporto di Caselle Torinese



Alauda arvensis
(Allodola), Sven-Erik Arndt



Apus apus
(Rondone), Walter Brunner



Buteo buteo
(Poiana), Giacomo Tonoli



Coloeus monedula
(Taccola), Markus Rantala



Columba livia
(Piccione), Kentish Plumber



Columba palumbus
(Colombaccio), Romzig



Falco tinnunculus
(Gheppio), Tisha Mukherjee



Hirundo rustica
(Rondine), Charles J. Sharp



Larus michahellis
(Gabbiano reale), Jörg Hempel



Tyto alba
(Barbagianni), Alun Williams

Elaborazione propria su dati ENAC, Relazione Annuale Wildlife Strike, 2024

Nell'anno 2024 sono state registrate presso l'Aeroporto di Torino-Caselle (ENAC, 2024):

44.005 OSSERVAZIONI DI VOLATILI

22 IMPATTI CON VOLATILI

FONTI ATTRATTIVE DI FAUNA SELVATICA
Per le zone limitrofe agli aeroporti

Il documento dell'ENAC sulle **Linee Guida per la valutazione delle fonti attrattive di fauna selvatica** (ENAC, 2009) suggerisce le pratiche di gestione per la mitigazione del **rischio di bird strike nelle zone limitrofe all'aeroporto**, identificando come principali fonti attrattive le zone umide, la vegetazione e le opere e attività umane.

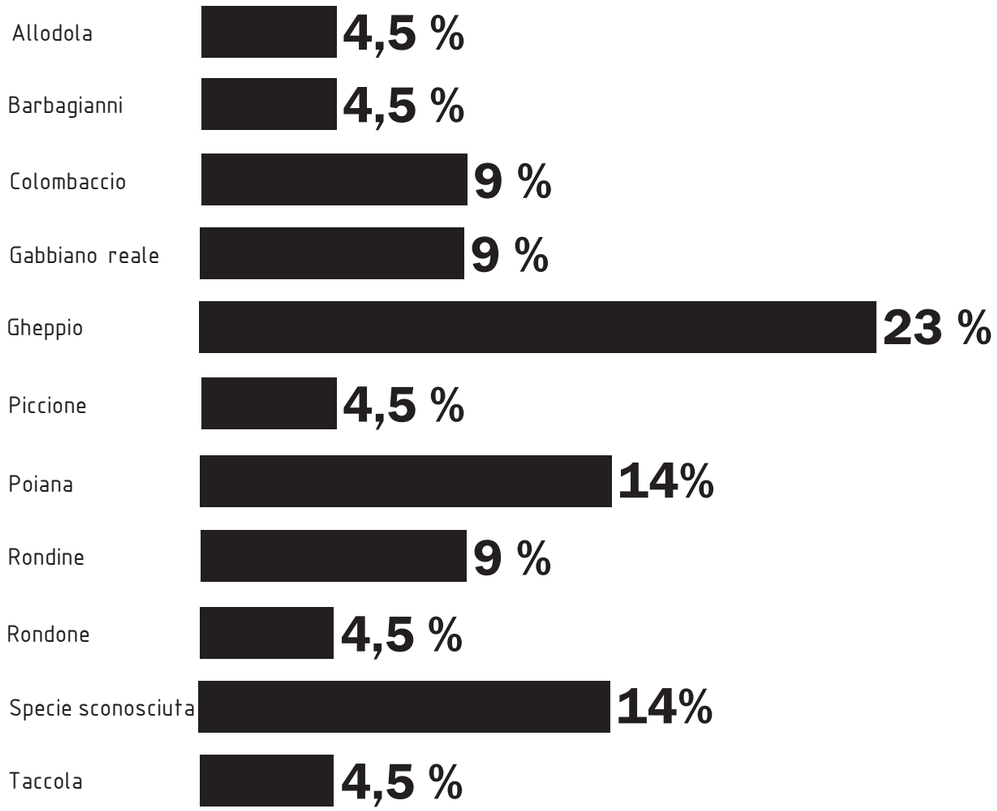
Zone umide
Le zone umide sono tra le fonti più attrattive e vengono distinte in quelle naturali, meno pericolose, e quelle artificiali. In generale, si raccomanda di non realizzare **impianti di depurazione, bacini o laghetti e canali o corsi d'acqua**. Le pratiche per la mitigazione nelle zone umide prevedono una riduzione nella densità della vegetazione, il mantenimento delle acque profonde a 4 m così da evitare la crescita di vegetazione spontanea, l'interramento dei canali e l'inserimento di barriere fisiche come reti o bird balls, grazie alle quali la superficie dell'acqua viene percepita dagli uccelli non più come liquida ma solida. Inoltre, nelle vicinanze aeroportuali non devono essere presenti aree naturali protette, in quanto costiuiscono habitat ideali per la fauna selvatica e la biodiversità.

Vegetazione
La vegetazione non deve rappresentare fonte di cibo o rifugio per la fauna. Il documento dell'ENAC (2009) afferma come la **distruzione di tutta la vegetazione** sarebbe l'unico mezzo possibile per non offrire possibili fonti di attrazione alla fauna selvatica. Tuttavia, qualora questa prospettiva, per ovvie ragioni, non sia possibile, è necessario attuare delle **pratiche di gestione.** Per le piante ornamentali devono essere selezionate specie che non producono frutti, bacche o semi.

La **potatura** deve essere **periodica** in modo da ridurre la possibilità di nidificazione per gli uccelli. La **vegetazione spontanea** deve essere costantemente **rimossa** così da mantenere il sito aperto e visibile, scoraggiando quindi gli animali a fermarsi in un'area che non percepiscono più come sicura. Per quanto riguarda i **prati**, in passato si attuava un taglio periodico che prevedeva un'altezza del manto erboso di 5-10 cm. Questo permetteva però maggiore visibilità per i predatori sulle risorse trofiche. Pertanto, negli ultimi anni si è adottata la *Long grass policy* in cui i prati vengono mantenuti ad un'altezza di 25-30 cm con una selezione vegetale mirata. Anche i **campi agricoli** possono costituire una fonte di attrazione dell'avifauna, specialmente durante le operazioni di aratura, piantumazione e raccolta, raccomandando che queste vengano svolte durante le ore notturne. Pertanto, la realizzazione di superfici agricole entro i 13 km di distanza dall'aeroporto deve essere valutata da esperti e la presenza di piantumazioni di alberi da frutto è assolutamente vietata entro i 3 km.

Opere e attività umana
In questo caso vengono poste delle limitazioni per l'inserimento di opere e attività. In primo luogo si fa riferimento alle **discariche**, considerate tra le maggiori fonti attrattive di fauna selvatica in quanto riserve di cibo. Un altro caso è quello delle **industrie manifatturiere**, la principale preoccupazione risiede nel fatto che, generalmente, i cicli produttivi necessitano d'ingenti quantità d'acqua e la gestione di questa può diventare una fonte di attrazione. Per mitigare il rischio si prevede lo stoccaggio e la conservazione di eventuali prodotti alimentari in spazi chiusi e l'interramento di canali di scolo per le acque di scarico o l'utilizzo di barriere fisiche. Anche l'**allevamento di bestiame** può rappresentare un rischio a causa delle elevate quantità di rifiuti prodotti. Infine, anche eventuali **edifici abbandonati** possono essere utilizzati dalla fauna come rifugi.

PERCENTUALE SPECIE ORNITICHE NEGLI IMPATTI REGISTRATI



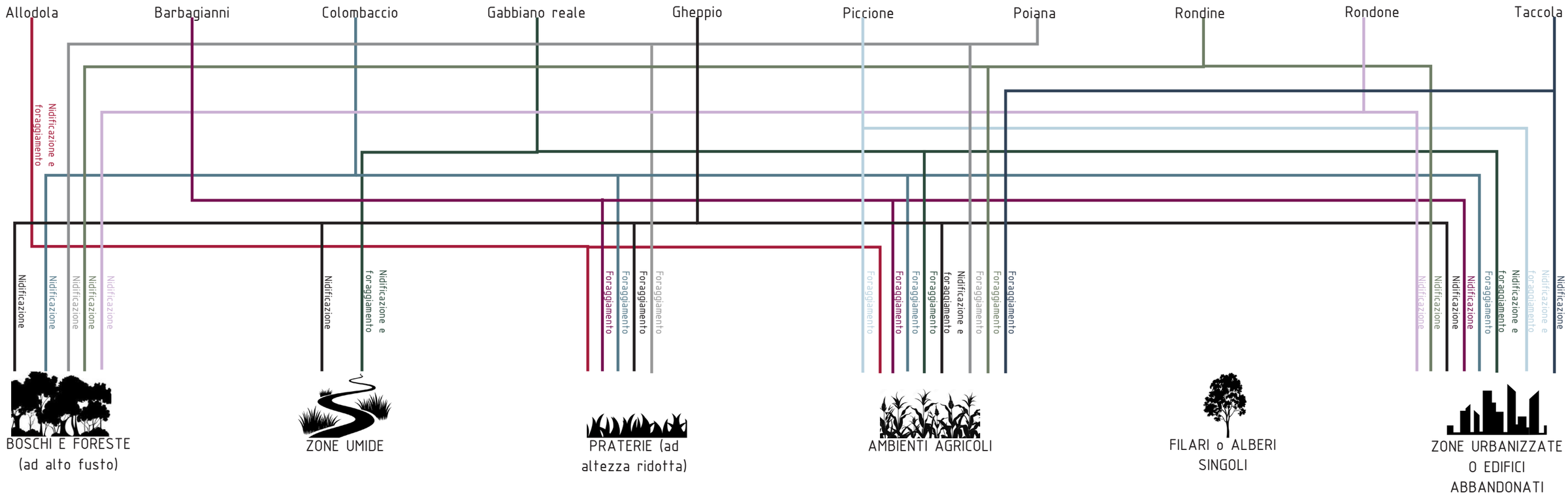
Elaborazione propria su dati ENAC, Relazione Annuale Wildlife Strike, 2024

SISTEMI ATTUALI PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO DI BIRD-STRIKE (ENAC, 2024):

Pratiche di gestione ecologica
- *Policy* per lo sfalcio delle aree verdi con altezza minima tra 9-12 cm e massima tra 30-35 cm
- *Poor grass regime*, riducendo il valore nutritivo del manto erboso, diminuisce anche il numero di invertebrati e, di conseguenza, la fonte attrattiva
- *Short grass policy* con sfalci più frequenti e altezze ridotte, compromettendo la presenza di arvicole
- Pulizia periodica delle sponde dei canali
- Cementificazione delle sponde dei canali
- Potature frequenti su alberi ornamentali

Sistemi di dissuasione diretta
- Auto con sirena bitonale e luci anticollisione
- 22 falconidi
- 2 cani di razza border collie
- 1 distress call
- 2 fari direzionabili
- 2 dissuasori laser
- 1 pistola a salve
- 1 cannone a gas
- 1 fischietto acustico

HABITAT DI NIDIFICAZIONE E FORAGGIAMENTO



Elaborazione propria su dati LIPU ODV

VALUTAZIONE DEL RISCHIO PER SPECIE ORNITICHE

	MASSA CORPOREA	APERTURA ALARE	FENOLOGIA	RISCHIO
Gabbiano reale *Larus michahellis*	**317,5 g**	**130 cm**	**Sempre** Prevalenza invernale	**ALTO**
Barbagianni *Tyto alba*	**375 g**	**89 cm**	**Sempre**	**ALTO**
Colombaccio *Columba palumbus*	**287,5 g**	**66 cm**	**Sempre** Prevalenza autunnale	**MEDIO**
Piccione *Columba livia*	**287,5 g**	**66,5 cm**	**Sempre**	**MEDIO**
Taccola *Corvus monedula*	**219 g**	**70,5 cm**	**Sempre** Prevalenza invernale	**MEDIO**
Gheppio *Falco tinnunculus*	**197,5 g**	**67,5 cm**	**Sempre**	**MEDIO**
Poiana *Buteo buteo*	**95 g**	**120 cm**	**Sempre** Prevalenza invernale	**MEDIO**
Rondone *Apus apus*	**43 g**	**42 cm**	**Estate**	**BASSO**
Allodola *Alauda arvensis*	**40,5 g**	**33 cm**	**Sempre**	**BASSO**
Rondine *Hirundo rustica*	**20,5 g**	**33,5 cm**	**Estate**	**BASSO**

Elaborazione propria su dati LIPU ODV

CONSIDERAZIONI
Per le zone limitrofe agli aeroporti

Habitat di nidificazione e foraggiamento
Dal diagramma sull'Habitat di nidificazione e foraggiamento emerge una caratteristica importante: le specie ornitiche registrate nelle zone limitrofe all'aeroporto prediligono habitat agricoli, urbani e praterie ad altezza ridotta, caratterizzati da spazi aperti che garantiscono una maggiore visibilità della preda. Gli alberi singoli o in filari risultano invece poco frequenti da queste specie, in quanto privi di rifugi adeguati. Per quanto riguarda la nidificazione, le specie che utilizzano la vegetazione arborea prediligono boschi e foreste con alberi ad alto fusto e rami spessi, in grado di sostenere nidi stabili. Specie come il gheppio e il rondone nidificano invece in cavità di alberi ed edifici. Una selezione vegetale mirata, orientata verso specie arboree con tronchi e rami sottili e prive di cavità, permetterebbe quindi di introdurre boschetti o filari nell'area senza costituire nuovi siti di nidificazione per le specie presenti. Questo approccio trova un esempio consolidato nel progetto dello studio West8 all'Aeroporto di Schiphol, in cui sono stati messi a dimora dei boschetti di *Betula pubescens*, con rami sottili e corteccia liscia, documentando la quasi totale assenza di nidificazione (Geuze & Buijs, 2014).

Valutazione del rischio
Il diagramma sulla valutazione del rischio per le specie ornitiche dimostra che la gravità di un danno all'aviazione causato da un bird-strike dipende da alcune caratteristiche, quali la massa corporea, l'apertura alare e l'eventuale comportamento gregario delle specie avifaunistiche (UK CAA, 2017). Lo studio di Dolbeer et al. (2000) dimostra come il livello di rischio sia strettamente correlato alla massa corporea dell'esemplare. Sulla base di questo approccio è stata quindi condotta un'elaborazione propria, per ciascuna delle specie rilevate a Caselle (ENAC, 2024), calcolando la media del range d'intervallo di massa corporea e d'apertura alare riportato da LIPU ODV e, successivamente, è stato assegnato un livello di rischio (alto, medio o basso) in funzione di queste caratteristiche. Inoltre è stato analizzata anche la fenologia di ogni specie, ovvero la presenza stagionale di queste in un determinato luogo. Questo ha permesso di rilevare quanto una specie possa essere rischiosa e la sua presenza stagionale sul sito, in modo da orientare le scelte progettuali successive.

4.3.2
Il rumore esistente: l'aeroporto

LVA>75 dB(A)

ZONA C - SEDIME AEROPORTUALE

LVA: 65 - 75 dB(A)

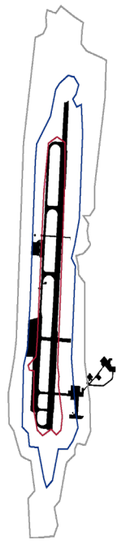
ZONA B - FASCIA DI RISPETTO

LVA: 60 - 65 dB(A)

ZONA A - FASCIA PIÙ ESTERNA

LVA< 60 dB(A)

FUORI ZONIZZAZIONE - ESTERNA ALLE FASCE DI RISPETTO



Zona C: LVA > 75 dB(A)
Zona B: LVA ≤ 75 dB(A)
Zona A: 60 dB(A) ≤ LVA ≤ 65 dB(A)
Aeroporto

Fonte: ARPA Piemonte, Sistema di monitoraggio del rumore dell'Aeroporto di Torino, 2013, Assaeroporti, Dati di traffico 2026

L'**Aeroporto di Torino-Caselle** comporta un impatto acustico sul territorio circostante. Questo **rumore**, a differenza di quello prodotto dal data center, non è continuo, ma dipende dai **movimenti di decollo e atterraggio**: nel solo mese di giugno 2026 sono stati registrati 4.529 movimenti totali (Assaeroporti, Dati di traffico 2026). A questo si deve inoltre aggiungere l'approvazione del masterplan per l'ampliamento dello scalo, che comporterebbe un aumento del numero di voli e, di conseguenza, un potenziale incremento della criticità acustica sul territorio circostante.
Per la valutazione e la gestione di questo impatto, la normativa italiana fa riferimento al **Livello di Valutazione Aeroportuale** (**LVA**), che classifica il territorio circostante l'infrastruttura in fasce di rispetto a intensità decrescente, cui corrispondono limitazioni differenziate all'uso del suolo:
- La **Zona C**, con LVA superiore a 75 dB(A), coincide con il sedime aeroportuale stesso e rappresenta l'area di massimo impatto acustico, entro la quale non sono ammessi insediamenti residenziali né attività non funzionali al servizio aeroportuale.
- La **Zona B**, compresa tra 65 e 75 dB(A), costituisce la fascia di rispetto vera e propria, in cui sono consentite attività agricole, industriali e commerciali, a condizione che vengano adottate misure di isolamento acustico.
- La **Zona A**, tra 60 e 65 dB(A), corrisponde alla fascia più esterna, in cui la presenza di insediamenti residenziali è consentita senza uno specifico obbligo di isolamento acustico.
Al di sotto dei 60 dB(A) il territorio si considera fuori zonizzazione aeroportuale, pur restando soggetto alle disposizioni del Piano di Classificazione Acustica comunale (ARPA Piemonte, Sistema di monitoraggio del rumore dell'Aeroporto di Torino, 2013).
L'area del data center si colloca al di fuori della Zona A, dunque fuori dalla zonizzazione aeroportuale vera e propria. Il contesto, già caratterizzato dal rumore preesistente aeroportuale, risulta tuttavia aggravato dal rumore aggiuntivo, di natura diversa, generato dal nuovo polo tecnologico.

MOVIMENTI TOTALI NEL MESE DI GIUGNO 2026 PER L'AEROPORTO DI CASELLE TORINESE

4.529

A Caselle Torinese è in fase di realizzazione il nuovo data center hyperscale. Il Piano Particolareggiato a cui fa riferimento descrive l'inserimento di questo **nuovo polo tecnologico** in un'ampia area accanto all'aeroporto. Il progetto, promosso dalla società SATAC SIINQ S.p.A., prevede 6 edifici per l'elaborazione dati con altezze diverse in relazione alla posizione, in modo tale da rispettare le fasce di rischio legate alla vicinanza con la pista aeroportuale, a cui si affianca un edificio dedicato a industrie ad alta tecnologia.

La **rete elettrica** a cui si appoggia il data center è quella nazionale (prevalentemente composta da combustibili fossili). Per garantire un approvvigionamento energetico continuo, il data center si allaccia a una nuova linea ad alta tensione e prevede anche l'inserimento di sistemi di raffreddamento e generatori di emergenza per sostenere l'attività continua dei server. Inoltre, nel Piano Particolareggiato, l'approvvigionamento da **fonti rinnovabili** non è assunto come criterio obbligatorio, a causa dell'elevata econtinua richiesta energetica del data center.

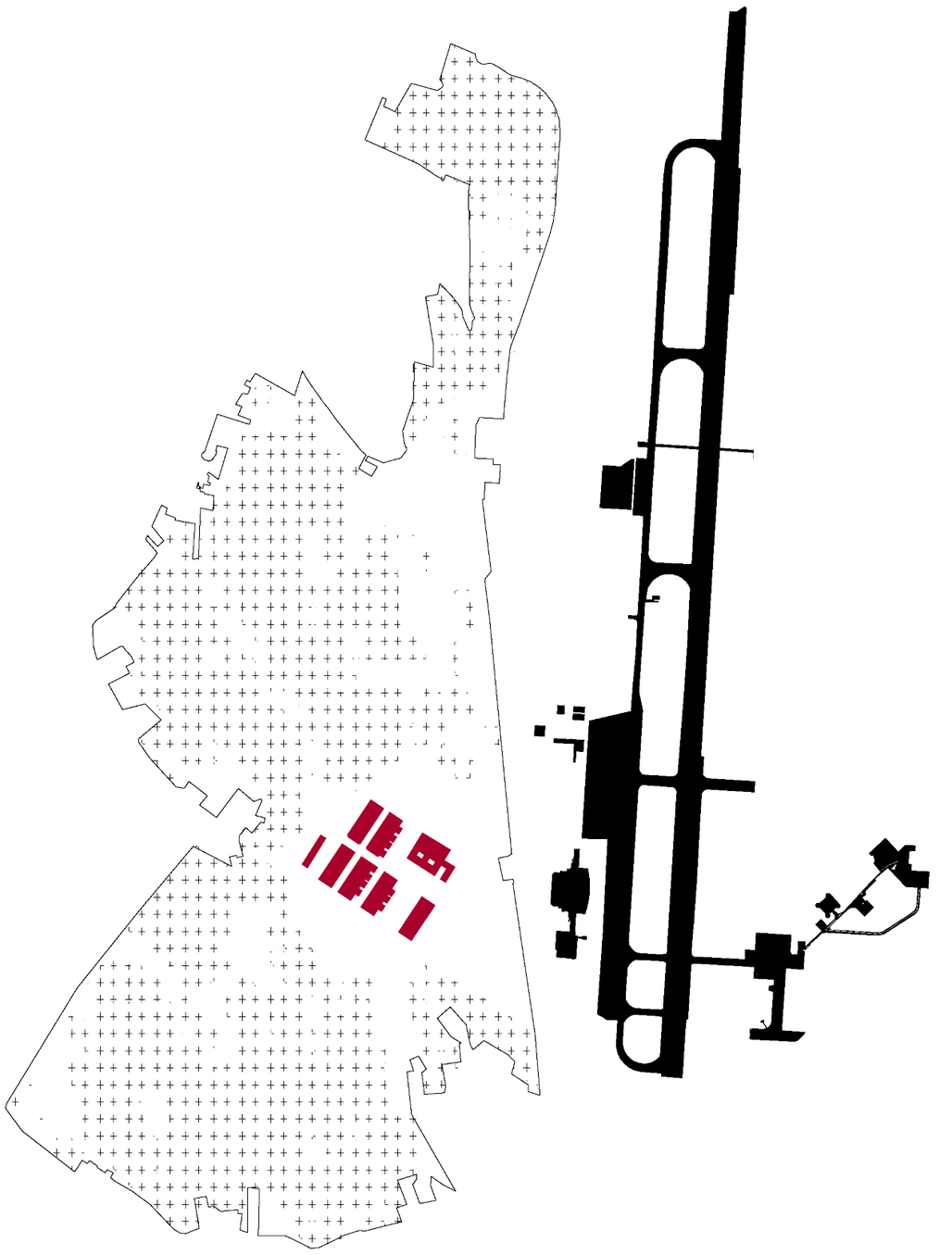
Per quanto riguarda il **sistema di raffreddamento**, nel Piano Particolareggiato (2024) si fa riferimento ad un sistema basato su gruppi frigo e a unità di tank cooling, una tecnologia avanzata che comporta un risparmio idrico notevole. Nel Rapporto Ambientale (2026) della Variante Strutturale n. 3, invece, si fa riferimento ad un sistema a circuito chiuso con chiller ad aria o acqua, tecnologia meno avanzata rispetto al tank cooling ma comunque abbastanza efficace nel limitare il consumo idrico poiché l'acqua non evapora ma viene ricircolata.

Da questo progetto emerge una combinazione di fattori critici: l'ingente **impatto ambientale generato**, la necessità di un **sistema di raffreddamento continuo** e la **posizione** stessa del data center, sospesa tra campi agricoli e sedime aeroportuale.

Grazie ai dati tecnici dichiarati dal Piano Particolareggiato (2024) sulla potenza IT e la potenza elettrica totale, è stato possibile quantificare l'impronta ambientale che comporterà la realizzazione di questa infrastruttura digitale.

4.4 QUANTO PESA UN DATO?

INQUADRAMENTO



Data center
Infrastruttura aeroportuale
Campi agricoli e prati da sfalcio
Area di progetto

500 m

Fonte: Uso del Suolo Agricolo, BDTRE Regione Piemonte 2025

STRUTTURA

6 EDIFICI PER IL CENTRO ELABORAZIONE DATI (CED)

1 EDIFICIO PER INDUSTRIA AD ALTA TECNOLOGIA HI-TECH

IMPIANTI TECNICI

Secondo quanto dichiarato dal Piano Particolareggiato del 2024:

SALE DATI	**40**
GRUPPI ELETTROGENI	**116**
GRUPPI FRIGO	**187**
TANK COOLING	**84**

Secondo quanto dichiarato dalla Variante strutturale n.3 del 2026:

SALE DATI	**40**
GRUPPI ELETTROGENI	**116**
CHILLER	**232**

POTENZE

168 MW POTENZA IT

252 MW POTENZA ELETTRICA TOTALE

Fonte: Piano Particolareggiato, 2024, Variante strutturale n. 3, 2026

4.4.1
Consumo energetico

1,472 **TWh/ anno**

CONSUMO ENERGETICO ANNUO APPARECCHIATURE IT

2,207 **TWh/ anno**

CONSUMO ENERGETICO ANNUO TOTALE

66,7%

Datacenter Infrastructure Efficiency (DCiE)

1,5

Power Usage Effectiveness (PUE)

L'**energia annua totale** è calcolata come prodotto della potenza elettrica installata per le ore di funzionamento annue (Serway & Jewett, 2014), applicando la formula (2.1.2), già presentata nel paragrafo 2.1, e considerando l'operatività continua dell'impianto 24 ore su 24 su, 365 giorni l'anno:

$$E_{totale} = 252\ MW \cdot 8760\ h = 2.207.520\ MWh/anno = 2,21\ TWh/anno \quad (2.1.2)$$

Allo stesso modo, applicando la medesima formula alla potenza IT, è possibile calcolare l'**energia annua** assorbita dalle sole **apparecchiature informatiche**:

$$E_{IT} = 168\ MW \cdot 8760\ h = 1.471.680\ MWh/anno = 1,47\ TWh/anno \quad (2.1.2)$$

Dal Piano Particolareggiato, descritto nel paragrafo precedente, emerge la potenza elettrica e la potenza IT. Da questi due valori è possibile calcolare il ***Power Usage Effectiveness*** (**PUE**), l'indice standard per misurare l'efficienza energetica, applicando la formula (2.1.3), già introdotta nel paragrafo 2.1:

$$PUE = P_{elettrica} / P_{IT} = 252\ MW \cdot 168\ MW = 1,5 \quad (2.1.3)$$

Un **PUE pari ad 1,5** indicherebbe che, per ogni watt che viene utilizzato dai server, i sistemi di raffreddamento e le altre componenti di supporto richiedono un **ulteriore 50% di energia**.

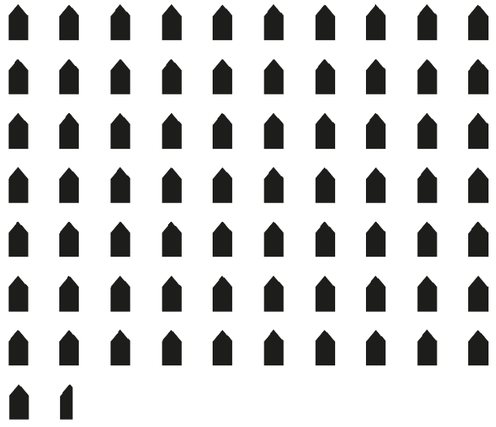
La PUE è in stretta relazione con **DCiE** (***Data Center Infrastructure Efficiency***) ed applicando la formula (2.1.4), già presentata nel paragrafo 2.1, è possibile risalire alla metrica di efficienza energetica:

$$DCiE = (P_{IT} / P_{elettrica}) \cdot 100\% = (168\ MW/252\ MW) \cdot 100\% = 66,7\% \quad (2.1.4)$$

Quindi il data center avrà un'efficienza pari al 66,7%.

817.600

NUMERO DI ABITAZIONI EQUIVALENTI AL CONSUMO ENERGETICO DEL DATA CENTER



Ogni icona rappresenta 10.000 abitazioni. Elaborazione propria con calcoli derivati dal Piano Particolareggiato, Città di Caselle Torinese, 2024.

Per contestualizzare l'entità di questi consumi, secondo il rapporto ARERA (2023), il consumo elettrico medio annuo di una famiglia tipo italiana è pari a 2.700 kWh. Il numero di abitazione il cui consumo elettrico equivale a quello del data center è quindi:

$$n.\ abitazioni = E_{DC} / E_{famiglia} \quad (4.4.1.1)$$

$$n.\ abitazioni = 2.207.520.000\ kWh / 2700\ kWh = 817.600\ abitazioni$$

Il **data center di Caselle Torinese** consumerà annualmente un'energia elettrica equivalente a quella di circa **817.600 famiglie italiane** nello stesso periodo di tempo, un dato che evidenzia con chiarezza la rilevanza delle strategie di mitigazione dell'impatto ambientale adottate nel progetto.

4.4.2
Emissioni di CO_2

594.264 **tCO_2/ anno**

EMISSIONI DI CO_2 PRODOTTE

Per quanto riguarda le **emissioni di CO_2** relative al data center di Caselle Torinese si applica la formula (2.2.2), già citata nel paragrafo 2.2:

$$CUE = CEF \cdot PUE \tag{3.2.2}$$

Il **fattore di emissione medio** (**CEF**) del mix elettrico nazionale per l'anno 2023, secondo il report n. 413 ISPRA (2025), è pari a 269,2 gCO2/kWh, ovvero 0,2692 kg CO_2/kWh. Considerando, come è stato calcolato in precedenza, che la PUE è pari a 1,5 si ottiene:

$$CUE = 0{,}2692 \cdot 1{,}5 = 0{,}4038\ kg\ CO_2\ /\ kWh \tag{2.2.2}$$

Avendo ricavato il valore di CUE, a questo punto, è possibile utilizzare la formula (2.2.1) per stimare le **emissioni totali di CO_2 del data center**:

$$CUE = Emissioni\ totali\ di\ CO_2\ /\ E\ apparecchiature\ IT \tag{2.2.1}$$

Da cui, riorganizzando l'equazione:

$$Emissioni\ totali\ di\ CO_2 = CUE \cdot E\ apparecchiature\ IT \tag{4.4.2.1}$$

$$Emissioni\ totali\ di\ CO_2 = 0{,}4038\ \ kg\ CO_2/kWh$$
$$1.471.680.000\ kWh = 594.264.384\ kgCO_2$$

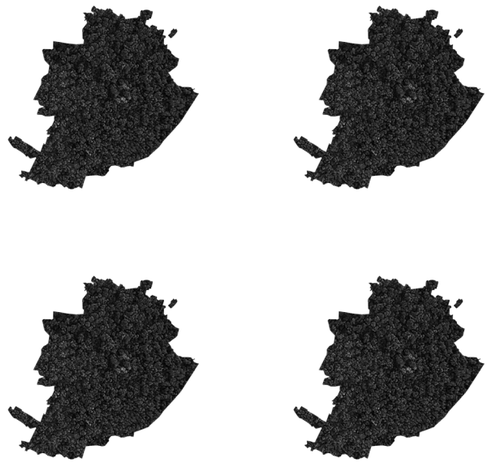
In conclusione, le emissioni operative stimate per il data center di Caselle Torinese ammontano a 594.264 tonnellate di CO_2 all'anno. Questo valore rappresenta una stima teorica basata sul fattore di emissione medio (CEF) della rete elettrica della Regione Piemonte.

27 mln **alberi**

ALBERI NECESSARI PER COMPENSARE LE SOLE EMISSIONI DI CO_2 PRODOTTE DAL DATA CENTER

4,15 x

SUPERFICIE DI TORINO



Per mitigare le emissioni di CO_2 dovrebbero essere presenti 27.012.017 alberi, che si estenderebbero su una superficie di 54.024 ha, pari a 4,15 volte la superficie del Comune di Torino. Elaborazione propria: emissioni di CO_2 calcolate su dati del Piano Particolareggiato, Città di Caselle Torinese, 2024, il fattore di assorbimento da EEA, 2011, la densità forestale da Madrigal-González et al., 2023 e la superficie di Torino da ISTAT, 2026.

Per contestualizzare l'impatto ambientale di tali emissioni, è possibile calcolare il numero di alberi necessari per la loro compensazione naturale. Secondo l'*European Environment Agency* (EEA), un albero adulto assorbe in media 22 kgCO_2/anno (EEA, 2011). Pertanto, per compensare le emissioni del data center di Caselle Torinese:

$$n.\ alberi = 594.264.384\ kg\ CO_2 / 22\ kg\ CO_2 = 27.012.017\ alberi \quad (4.4.2.2)$$

Dall'analisi emerge quindi che, per compensare le sole emissioni di CO_2 derivanti dal consumo elettrico del data center, sarebbe necessaria la presenza di circa **27 milioni di alberi a maturità**.

Secondo i dati ufficiali ISTAT, il Comune di Torino ha una superficie pari a 129,999 km², ovvero circa 13.000 ha (ISTAT, 2026). Considerando che le foreste in zone temperate ospitino in media 500 alberi per ettaro a maturità (Madrigal-Gonzàlez et al., 2023) la superficie forestale necessaria risulta:

$$ha = n.\ alberi / densità\ forestale \quad (4.4.2.3)$$

$$ha = 27.012.017 / 500\ alberi/ha = 54.024\ ha$$

Rapportando tale valore alla superficie comunale di Torino:

$$Rapporto\ superficie = superficie\ foresta / superficie\ Torino \quad (4.4.2.4)$$

$$Rapporto\ superficie = 54.024\ ha / 12.999\ ha = 4,15$$

Ne consegue che, per compensare naturalmente le emissioni del data center, sarebbe necessaria una foresta di estensione pari a circa **4 volte la superficie del Comune di Torino**.

Nel caso delle emissioni di CO_2, il Rapporto Ambientale (2026) non fornisce alcun valore quantitativo ma si limita solo ad una trattazione qualitativa.

4.4.3
Consumo idrico

7,26 mln L/ giorno

CONSUMO GIORNALIERO PER SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO TRADIZIONALI

806.400 L/ giorno

CONSUMO GIORNALIERO PER SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO A TANK COOLING

L'impronta idrica del data center di Caselle Torinese si può stimare facendo riferimento all'equazione (2.3.1) del ***Water Usage Effectiveness*** (**WUE**), definita come:

WUE = Consumo diretto / Energia apparecchiature IT (2.3.1)

Per calcolare l'**energia giornaliera** assorbita dalle apparecchiature IT si applica la formula dell'energia (2.1.1), già presentata nel paragrafo 2.1, considerando questa volta le 24 ore giornaliere anziché le 8760 ore annue:

$$Energia_{\,IT\ giornaliera} = 168000\ kW \cdot 24\ h = 4.032\ MWh/giorno = 4.032.000\ kWh/giorno \quad (2.1.1)$$

In uno scenario cautelativo, lo studio di Jiang et al. (2025), condotto sui data center in Cina, adotta un valore WUE pari a 1,8 L/kWh per i casi che utilizzano ancora **sistemi di raffreddamento prevalentemente tradizionali**. Il consumo idrico giornaliero in questo scenario risulta pari a:

$$Consumo\ idrico = 1{,}8\ L/kWh \cdot 4.032.000\ kWh/giorno = 7.257.600\ L/giorno$$

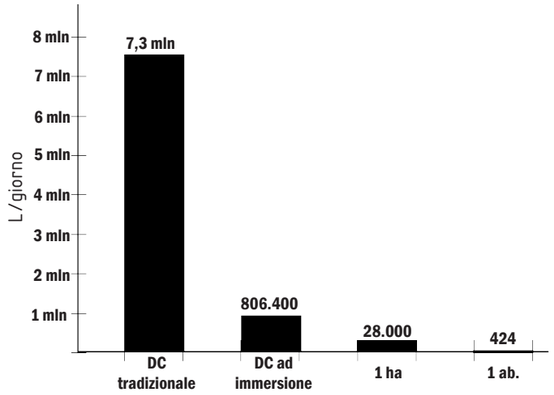
Nel caso del data center di Caselle Torinese, secondo il Piano Particolareggiato del 2024, non vengono fornite esplicite informazioni sulla gestione idrica, in particolare riguardo alla fonte di approvvigionamento dell'acqua e alle modalità di scarico delle acque reflue. L'unico riferimento tecnico presente riguarda l'adozione di un sistema di raffreddamento basato su *tank cooling* e gruppi frigo (Città di Caselle Torinese, 2024). Il Piano Particolareggiato del 2024 non specifica la tecnologia esatta dei tank cooling: questi potrebbero essere dei serbatoi di accumulo per l'acqua di raffreddamento oppure dei sistemi di *immersion cooling* (tecnologia di raffreddamento più avanzata). Quest'ultimo, permette di ridurre significativamente il consumo idrico rispetto ai sistemi evaporativi tradizionali. Khatib et al. (2025) indicano che l'obiettivo per i data center più avanzati, ovvero quelli che adottano questa tecnologia, è quello di ottenere valori WUE intorno ai 0,2 L/kWh, un obiettivo necessario rispetto alla crescita della domanda legata all'intelligenza artificiale.

Adottando questo valore in uno scenario più ottimistico, il consumo idrico giornaliero del data center di Caselle Torinese risulterebbe pari a:

$$Consumo\ idrico = 0{,}2\ L/kWh \cdot 4.032.000\ kWh/giorno = 806.400\ L/giorno$$

17.117 x

QUANTITÀ D'ACQUA RICHIESTA DAL DATA CENTER DI CASELLE TORINESE RISPETTO AL FABBISOGNO IDRICO DI 1 ABITANTE



Confronto del consumo idrico giornaliero tra 1 abitante, 1 ettaro di superficie agricola e i due scenari (tradizionale e *tank cooling*) del data center di Caselle Torinese. Elaborazione propria su dati ISTAT, 2024 (abitante) e Sapino et al., 2020 (superficie agricola). Per il data center, calcoli e diagrammi derivati dai dati del Piano Particolareggiato, Città di Caselle Torinese, 2024.

A questi due scenari, si affianca un terzo termine di confronto riportato nella **Valutazione Ambientale Strategica** del progetto della Città di Caselle Torinese del 2026, che descrive per il data center un sistema di raffreddamento a circuito chiuso con chiller ad aria o acqua e non più, come era stato dichiarato dal Piano Particolareggiato del 2024, un sistema a *tank cooling*.

In questo caso l'acqua non evaporerebbe, ma verrebbe **ricircolata** internamente al sistema attraverso un ciclo di compressione del refrigerante. Il documento stima un volume d'acqua contenuto nel circuito pari a 12.000-15.000 L per ogni MW IT installato, ovvero 2,53 milioni di L in totale relativo all'intero data center, caricato solo una volta durante la costruzione dell'impianto.

Quindi l'**approvvigionamento dell'acqua** dalla rete idrica comunale, secondo quanto dichiarato, si limiterebbe al reintegro di **perdite dell'impianto**, il cui impatto viene qualificato come trascurabile ma senza essere quantificato in un valore.
Questa assenza è imputabile alla scelta di comunicazione del documento: a differenza dei sistemi evaporativi, in cui il consumo idrico è direttamente proporzionale al calore che viene prodotto, nel sistema di raffreddamento a circuito chiuso il consumo dipende dal tasso di perdita dell'impianto. Un'ulteriore criticità, come evidenziato nel paragrafo 2.3, l'acqua impiegata nei circuiti di raffreddamento dei data center deve essere di **qualità elevata**, per evitare ostruzioni nelle tubature e proliferazioni batteriche (Li et al., 2025). Il circuito chiuso richiede pertanto acqua demineralizzata e trattamenti chimici di condizionamento, la cui gestione e smaltimento dell'acqua durante le manutenzioni non viene affrontata nel documento.

Lo scarto idrico complessivo del sistema quindi potrebbe risultare superiore a quanto dichiarato.

Infatti, come già affrontato nel paragrafo 2.3, la trasparenza dei dati sul consumo idrico dei data center rappresenta un problema ricorrente a livello internazionale, tanto che valori realistici sono spesso emersi solo a seguito di contenziosi legali, come nel caso del data center Google di *The Dalles* (Rogoway, 2022), e la scarsità di dati pubblici rende la stima dell'impatto idrico globale molto approssimativa (Ristic et al., 2015 & De Vries-Gao, 2026).

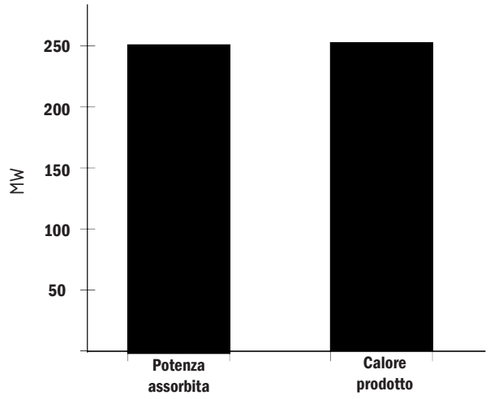
Va inoltre osservato che i tre scenari qui discussi si riferiscono unicamente al consumo diretto (*scope 1*) legato al raffreddamento: restano esclusi il consumo idrico indiretto associato alla produzione dell'energia elettrica (*scope 2*), che secondo Shehabi et al. (2024) può risultare fino a dodici volte superiore a quello diretto, e il consumo legato alla produzione di chip e apparecchiature IT (*scope 3)*, secondo la classificazione di Li et al. (2025).

Inoltre, i dati numerici forniti dalla Valutazione Ambientale Strategica non riguardano il processo di raffreddamento delle apparecchiature IT, ma si riferiscono a usi civili e accessori dell'edificio come acqua potabile e umidificazione. Per questo motivo, pur trattandosi di un dato reale e ufficiale, non può essere assunto come termine di paragone quantitativo con gli scenari WUE sopra discussi, che misurano invece il consumo diretto del data center.

4.4.4
Calore generato

252 MW

CALORE IN USCITA PRODOTTO DAL DATA CENTER



Equivalenza tra la potenza elettrica totale assorbita (P) e il calore generato (Q), secondo il principio di conservazione dell'energia (Q = P elettrica). Elaborazione propria su dati Piano Particolareggiato, Città di Caselle Torinese, 2024.

Il calore, come illustrato nel paragrafo 2.4, per il principio di conservazione dell'energia, il calore generato da un data center può essere considerato pari alla potenza elettrica complessivamente assorbita dalla struttura. Applicando quindi la formula (2.4.1) già presentata nel paragrafo 2.4:

$$Q_{totale} = P_{elettrica}$$
$$Q_{generato} = 252\ MW \qquad (2.4.1)$$

Il data center di Caselle Torinese genera quindi un calore di scarto pari a 252 MW, un valore che, se rilasciato completamente nell'ambiente esterno, contribuirebbe ad aumentare l'isola di calore urbana, con potenziali ripercussioni sul microclima delle aree limitrofe (Zhang et a.l, 2015).

Nel contesto di Caselle Torinese, questo fenomeno potrebbe rappresentare un rischio anche per i campi agricoli circostanti, la cui produttività dipende in modo significativo dalle **condizioni microclimatiche locali**. Il paesaggio agricolo risulta quindi esposto ad un potenziale impatto, qualora non vengano adottate strategie di recupero e riutilizzo del calore di scarto.

4.4.5
Il rumore aggiunto: il data center

120,7 db(A)

LIVELLO DI POTENZA SONORA SENZA MITIGAZIONE

69,7 db(A)

LIVELLO DI PRESSIONE SONORA SENZA MITIGAZIONE



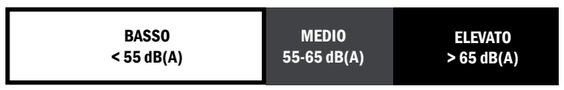
Supera il limite del Piano di Classificazione Acustica (Città di Caselle Torinese, 2026).

97,6 db(A)

LIVELLO DI POTENZA SONORA CON MITIGAZIONE

46,6 db(A)

LIVELLO DI PRESSIONE SONORA CON MITIGAZIONE



La strategia di mitigazione con cofanatura acustica dissipativa rientra nei limiti del Piano di Classificazione Acustica (Città di Caselle Torinese, 2026).

-23 db(A)

RIDUZIONE DEL RUMORE CON LA COFANATURA DISSIPATIVA

Nel paesaggio di Caselle Torinese, oltre al rumore aeroportuale, si aggiunge anche quello del data center. Dal Rapporto Ambientale della Variante Strutturale n. 3 (Città di Caselle Torinese, 2026) è stato possibile risalire al **rischio acustico**.

La sorgente principale di **rumore continuo** è costituita dal **sistema di raffreddamento**, in particolare dai chiller ad aria o acqua, distribuiti su sei edifici del data center per un totale di 232 unità. Il livello di potenza dichiarato di ogni chiller è pari a 97 dB(A). Considerando il data center come unica sorgente sonora composta da 232 elementi identici, il livello di potenza sonora totale del sito si ottiene applicando la formula (2.5.1):

$$L_{w\,tot} = 97 + 10\log10(232) = 120{,}7\ dB(A) \quad (2.5.1)$$

La propagazione si ottiene invece a partire dal calcolo della divergenza geometrica (2.5.3), definita dalla norma ISO 9613-2 (*International Organization for Standardization*, 1996), assumendo come distanza 100 m dalla sorgente:

$$A_{div} = 20\log10(100) + 11 = 51\ dB \quad (2.5.3)$$

Applicando quindi la formula (3.5.2):

$$L_p = 120{,}7 - 51 = 69{,}7\ dB(A) \quad (2.5.2)$$

Questo valore, confrontato con i limiti fissati dal Piano di Classificazione Acustica comunale (Città di Caselle Torinese, 2026), 65 dB(A) per il periodo diurno e 55 dB(A) per quello notturno, dimostra quanto il **rumore** sia **elevato a distanza ravvicinata dal data center**.

Il Rapporto Ambientale prevede infatti l'introduzione di una **cofanatura acustica dissipativa**, in grado di abbattere il livello di potenza sonora della singola unità fino a 74 dB(A). A questo punto, applicando la stessa formula (2.5.1) con il valore mitigato risulterebbe:

$$L_{w\,tot} = 74 + 10\log10(232) = 97{,}6\ dB(A) \quad (2.5.1)$$

L'intervento proposto **riduce** quindi il livello di potenza sonora complessivo del data center di oltre **23 dB(A)**.

Per la propagazione del suono Lp si utilizza nuovamente la formula (2.5.2):

$$L_p = 97{,}6 - 51 = 46{,}6\ dB \quad (2.5.2)$$

Il **valore mitigato rientra ampiamente** nei limiti fissati dal Piano di Classificazione Acustica. Questa stima considera solo la divergenza geometrica, mentre la verifica di TecnicAmbiente, condotta con un modello digitale tridimensionale del terreno su un campione di 29 ricettori, conferma la compatibilità del progetto con i limiti di Classe IV sia in periodo diurno sia notturno.

Resta tuttavia centrale il tema della **continuità**: a differenza del traffico aeroportuale, il rumore del data center è continuo.

4.5 LA MISURA DEL VISIBILE

Dopo aver definito, nel capitolo 3.1, il funzionamento e le formule di calcolo delle principali fonti energetiche rinnovabili, solare, eolica, idroelettrica e piezoelettrica, la ricerca si sposta sull'effettiva **applicabilità** di queste al caso studio del data center di Caselle Torinese.

A differenza dei combustibili fossili, capaci di occultarsi dietro un paesaggio apparentemente incontaminato, le **fonti rinnovabili** rendono necessariamente **visibile** l'infrastruttura energetica nel territorio: la loro fattibilità dipende quindi non solo dalle condizioni climatiche, ambientali e morfologiche del sito, ma anche dallo spazio effettivamente disponibile per la loro installazione.

Dato l'elevato impatto ambientale dimostrato nel capitolo 4.3, è necessario verificare le **risorse naturali disponibili** nel sito, per stabilire se queste possano effettivamente contribuire a soddisfare il fabbisogno energetico del data center. Vengono così analizzate le condizioni specifiche del contesto, dall'irraggiamento solare al regime anemometrico, dall'idrografia locale fino alle superfici stradali della pista aeroportuale, per verificare la reale fattibilità dell'energia rinnovabile nel sito.

4.5.1
Energia solare

768,15 ha

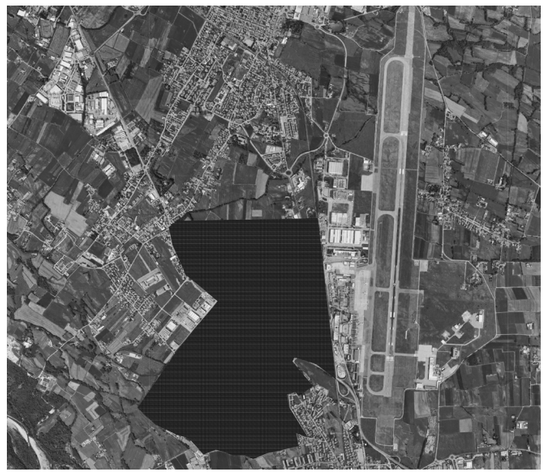
ESTENSIONE SUPERFICIALE DEI PANNELLI SOLARI

1,7 x

ESTENSIONE DI UN IPOTETICO IMPIANTO FOTOVOLTAICO (768,15 ha) NECESSARIO PER COMPENSARE IL FABBISOGNO RICHIESTO DAL DATA CENTER RISPETTO ALL'AREA DI PROGETTO (≈468 ha)



Nel primo diagramma l'intera area di progetto è ricoperta da pannelli solari, corrispondente a 1 volta il fabbisogno.



Nella seconda ortofoto è rappresentata una seconda area equivalente, di cui il 70% risulterebbe necessario a coprire la superficie fotovoltaica rimanente. Elaborazione propria su calcoli derivati da JRC, 2025 per la superficie fotovoltaica e da Green et al., 2023 per l'efficienza del pannello.

L'**energia solare**, come descritto in precedenza, è una fonte di energia pulita che permette di ricavare energia elettrica dalla luce solare.

Applicando al caso studio del data center di Caselle Torinese la formula (3.1.1) presentata nel capitolo 3.1, è possibile **stimare la superficie di pannelli solari necessaria** a coprire il fabbisogno energetico annuo di questa infrastruttura digitale, pari a 2.207.520 MWh/anno.

Riorganizzando algebricamente l'equazione (3.1.1) si ottiene la superficie richiesta:

$$As = E\ richiesta\ /\ r \cdot GR \cdot PR \qquad (4..5.1.1)$$

Il valore di **irraggiamento medio annuo (GR)** per Caselle Torinese, ricavato tramite lo strumento PVGIS (JRC, 2025), è pari a **1,8 MWh/m²/anno**. Il Performance Ratio (PR) è stato ricavato sempre dalla piattaforma PVGIS, facendo riferimento alle perdite del sistema totali, pari al 22,29% (JRC, 2025), da cui:

$$PR = 1 - 0{,}2229 = 0.78$$

L'efficienza del pannello solare (r) si può attestare intorno al 20%, ovvero 0,2 (Green et al., 2023). Grazie a questi dati è quindi possibile calcolare la superficie di pannelli solari necessaria per sopperire al fabbisogno energetico del data center di Caselle Torinese:

$$As = 2.207.520\ /\ 0{,}2 \cdot 1{,}8 \cdot 0{,}78 = 7.861.538{,}5\ m^2 = 786{,}15\ ha \qquad (4..5.1.1)$$

Considerando che l'**estensione dell'area di progetto** è di circa **465 ha**, la superficie di pannelli solari necessaria risulterebbe circa **1,7 volte più estesa** rispetto all'intera area del parco. Questo risultato dimostra l'**impraticabilità del fotovoltaico** come soluzione energetica per il caso studio di Caselle Torinese. Inoltre, tale impraticabilità è ulteriormente aggravata dalla vicinanza con l'aeroporto: la tavola PC-01 A delle Mappe di Vincolo dell'ENAC, descritta nel capitolo 5.2.10, impone delle limitazioni all'installazione di campi fotovoltaici di grandi dimensioni nelle aree limitrofe all'aeroporto (ENAC, 2010).

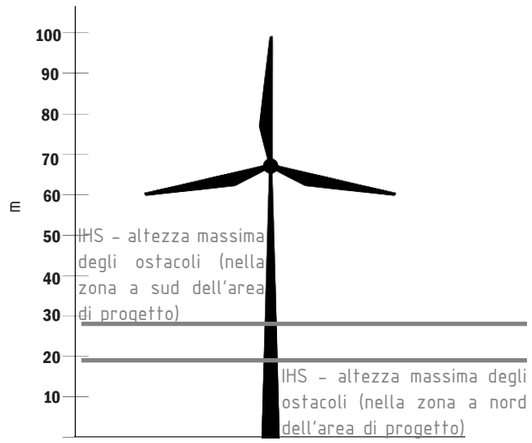
4.5.2
Energia eolica

2,2 m/s

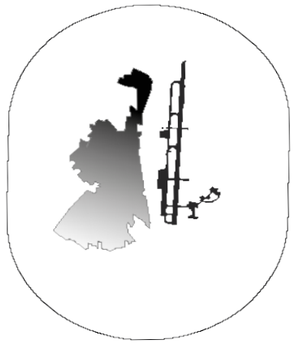
VELOCITÀ DEL VENTO MEDIA ANNUALE (2025)
A Caselle Torinese la velocità del vento non permette l'inserimento di energia eolica.

3 - 5,4 m/s

VELOCITÀ DI CUT-IN MINIMA DEL VENTO
La velocità di cut-in indica la velocità del vento necessaria per permettere al rotore della turbina eolica di generare energia elettrica.



Il grafico mostra quanto una turbina eolica con altezza 100 m ecceda rispetto ai limiti consentiti dalla Superficie Orizzontale Interna (IHS). L'altezza massima degli ostacoli varia a seconda della quota del terreno. Elaborazione propria su dati ENAC, PC-01B 2010.



Quota area di progetto [m s.l.m.]
286 m 312 m
Superficie Orizzontale Interna (IHS)

L'altezza massima degli ostacoli varia a seconda della quota del terreno, nella parte a nord dell'area di progetto gli ostacoli dovranno avere un'altezza minore ai 19,5 m mentre in quella a sud circa 28 m. Elaborazione propria su dati ENAC, PC-01B 2010.

L'energia eolica, come per il caso precedente, presenta limitazioni dovute alla vicinanza con l'aeroporto: la tavola PC-01 C delle Mappe di Vincolo dell'ENAC, descritta anch'essa nel capitolo 5.2.10, individua le **zone soggette a limitazione per l'installazione di impianti eolici**.

Tuttavia, anche nel caso in cui questo vincolo potesse essere superato, i dati estrapolati da *Iowa Environmental Mesonet* (IEM), dimostrano che la **velocità media annua** del vento per il 2025 è stata di **2,2 m/s**. Questo valore, come descritto nel capitolo 3.1, sarebbe insufficiente ad azionare le turbine eoliche di grande scala, ma teoricamente sufficiente per quelle di tipo micro-eolico ad asse verticale. Pertanto però la produzione energetica risulterebbe del tutto trascurabile rispetto al fabbisogno del data center.

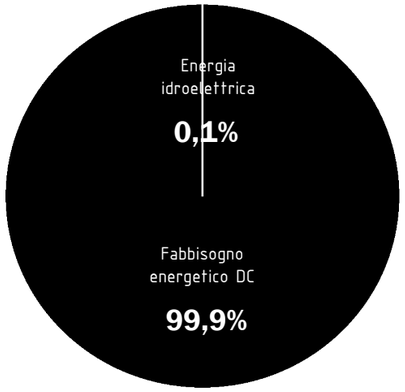
4.5.3
Energia idroelettrica

2.281 **MWh/anno**

ENERGIA IDROELETTRICA prodotta dal fiume Stura di Lanzo

260,4 **kw**

POTENZA IDROELETTRICA prodotta dal fiume Stura di Lanzo



Rapporto tra l'energia prodotta dal fiume Stura di Lanzo e il reale fabbisogno energetico richiesto dal data center. Elaborazione propria su dati e calcoli derivati da ARPA Piemonte, stazione Lanzo-Stura di Lanzo, 2022-2024, e Piano Particolareggiato, Città di Caselle Torinese, 2024.

Per quanto riguarda l'**energia idroelettrica**, è necessario risalire alla portata del fiume che, in questo caso, è quello della **Stura di Lanzo**.
Considerando quindi i dati riportati dall'Arpa per la stazione idrometrica di Lanzo - Stura di Lanzo:
- per il 2022 la portata media annua era 8,64 m3/s
- per il 2023 la portata media annua era 13,5 m3/s
- per il 2024 la portata media annua era 25,3 m3/s

Dato che i valori oscillano in un range piuttosto ampia, si considera una media di questi tre anni, pari a **15,8 m^3/s**. Per il dislivello, il territorio di Caselle Torinese presuppone un salto di circa 2 m. Invece la densità dell'acqua è pari a 1.000 kg/m^3 e l'efficienza della turbina, nella migliore delle ipotesi per grandi centrali idroelettriche, è pari a 0,84 (Jung et al. 2021).

Questi dati permettono di calcolare la potenza dell'impianto idroelettrico con la formula (3.1.2):

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta$$

$$P = 1.000 \cdot 9,81 \cdot 15,8 \cdot 2 \cdot 0,84 = 260.396,64\ W = 260,4\ kW$$

Quindi l'energia annua che viene ricavata con la formula (2.1.2):

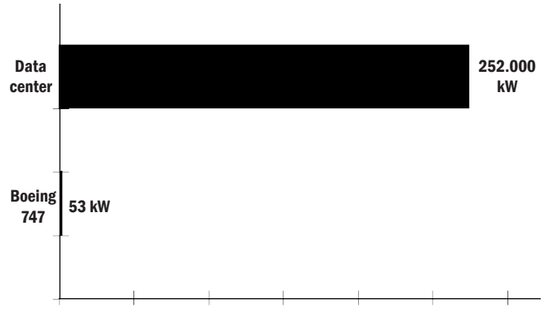
$$E_{annua} = 260,4 \cdot 8760 = 2.281.104\ kWh/anno = 2.281\ MWh/anno$$

Considerando che l'energia richiesta dal data center è pari a 2,207 TWh/anno e l'energia idroelettrica prodotta dal fiume è 2.281 MWh/anno, quest'ultima corrisponde dunque a circa lo **0,1% del fabbisogno energetico totale richiesto dal data center**.

4.5.4
Energia piezoelettrica

53 **kW**

ENERGIA IDROELETTRICA prodotta dal fiume Stura di Lanzo



Confronto tra la potenza istantanea prodotta da un Boeing 747 e quella necessaria al data center. Elaborazione propria su dati Tifrit et al., 2015 e Piano Particolareggiato, Città di Caselle Torinese, 2024.

L'**energia piezoelettrica**, come descritto nel capitolo 3.1, è una tecnologia emergente che permette di ricavare energia dalle **sollecitazioni meccaniche** prodotte dagli aerei sulla pavimentazione della **pista aeroportuale** durante le fasi di atterraggio e decollo.

Si tratta di una tecnologia ancora in fase sperimentale: secondo lo studio di Tifrit et al. (2025), un Boeing 747 a pieno carico genererebbe circa 53 kW di elettricità, un valore che potrebbe alimentare, ad esempio, il sistema di illuminazione aeroportuale.

Nel caso specifico del data center di Caselle Torinese, tuttavia, l'energia elettrica ricavabile da questa tecnologia risulterebbe pressoché trascurabile rispetto al fabbisogno energetico complessivo dell'infrastruttura. A ciò si aggiunge il fatto che l'aeroporto di Caselle Torinese è uno scalo di dimensioni contenute rispetto ai grandi hub internazionali, il che limita ulteriormente il potenziale energetico di questa tecnologia.

4.6 LA MISURA DELL'INVISIBILE

Dall'analisi appena condotta è stata dimostrata l'**infattibilità** delle fonti energetiche rinnovabili rispetto al fabbisogno energetico richiesto dal data center di Caselle Torinese.

La ricerca si sposta quindi dalla considerazione di un'improbabile autosufficienza energetica dell'infrastruttura digitale verso la possibilità di intervenire sui suoi metabolismi. Vengono così applicate le **strategie invisibili**, introdotte nel capitolo 3.2, definite tali in quanto prive di un impatto estetico sul paesaggio. Queste sono il ***free cooling*** e il **recupero del calore di scarto** (***Waste Heat Recovery***): il primo interviene agendo sulla struttura e sulla conformazione del data center, mentre il secondo agisce sullo scarto che viene prodotto.

Le formule presentate nel capitolo 3.2 vengono quindi utilizzate per stimare, da un lato, il **risparmio energetico** potenzialmente ottenibile attraverso il *free cooling* nei mesi in cui le condizioni climatiche favorevoli lo consentono, e, dall'altro, il calore di scarto effettivamente recuperabile dal sistema di raffreddamento adottato dal data center.

Quest'ultimo dato risulta particolarmente rilevante in vista della proposta progettuale, poiché individua il potenziale energetico disponibile per un possibile reimpiego del calore in ambito agricolo.

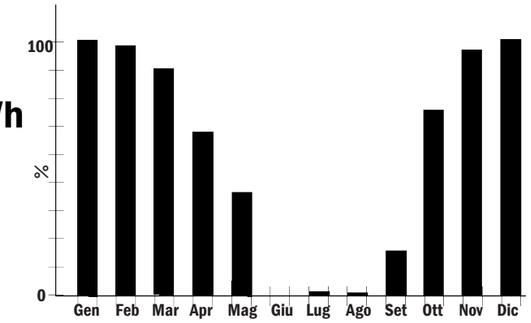
4.6.1
Free cooling: il freddo come risorsa

328.742 MWh

ENERGIA ELETTRICA RISPARMIATA ANNUALMENTE CON IL FREE COOLING

14,9%

PERCENTUALE DI ENERGIA ELETTRICA RISPARMIATA DAL DATA CENTER CON IL FREE COOLING



4.892 ore/anno totali sotto i 16°C, che corrispondono al 55,9% dell'anno. Elaborazione propria su dati Iowa Environmental Mesonet, stazione LIMF Torino-Caselle, 2025.

Il ***free cooling*** rappresenta, per il caso studio di Caselle Torinese, una strategia concreta per il risparmio energetico, sfruttando quindi le condizioni climatiche favorevoli durante i mesi più freddi dell'anno per ridurre l'utilizzo dei sistemi di raffreddamento meccanici.

Si applica quindi la formula (3.2.1.2), già presentata nel capitolo 3.2.1:

$$E_{risparmiata} = (PUE\ base - PUE\ free\ cooling\ ) \cdot P_{IT} \cdot\ Ore\ operative$$

Il valore di PUE base, per il data center di Caselle Torinese, calcolato nel paragrafo 4.3.1, è pari a 1,5. Tuttavia, per il PUE con free cooling si assume, in via cautelativa, il valore di 1,1 rilevato dallo studio di Güğül et al. (2023) su un data center in Turchia monitorato per 12 mesi. Si tratta di un valore di riferimento tratto da un caso studio esterno, non di un dato specifico per l'infrastruttura di Caselle Torinese.

Per quanto riguarda le ore operative, si considerano le ore annue in cui la **temperatura esterna si trova al di sotto dei 16°C**, ovvero quella necessaria per l'attivazione del ***free cooling*** **totale** (Dong et al., 2017). Sulla base dei dati orari rilevati dalla stazione meteorologica di Torino-Caselle (LIMF) per l'anno 2025 (Iowa Environmental Mesonet) sono state calcolate 4.892 ore. La distribuzione di queste ore non è uniforme, pertanto nei mesi estivi è necessario il ricorso praticamente esclusivo al sistema di raffreddamento meccanico.

La **potenza elettrica risparmiata** risulta dunque essere:

$$P_{risparmiata} = (PUE\ base - PUE\ free\ cooling) \cdot P_{IT} = (1{,}5 - 1{,}1) \cdot 168\ MW = 67{,}2\ MW \quad (3.2.1.1)$$

Mentre l'**energia elettrica risparmiata** annualmente:

$$E_{risparmiata} = 67{,}2\ MW \cdot 4.892\ h = 328.742{,}4\ MWh \quad (4.2.1.2)$$

Considerando l'energia totale richiesta dal data center pari a 2.207.520 MWh/anno, questo valore corrisponde a circa il **14,9% del fabbisogno energetico totale**.

A differenza del calore recuperato tramite *Waste Heat Recovery*, il risparmio energetico ottenuto con il *free cooling* agisce esclusivamente sui consumi interni del data center, senza generare relazioni dirette con il contesto territoriale circostante.

4.6.2
Waste Heat Recovery: il calore come risorsa

1,412 **TWh/anno**

ENERGIA TERMICA RECUPERATA ANNUALMENTE

64%

DEL CALORE DI SCARTO PRODOTTO ANNUALMENTE POTREBBE ESSERE RECUPERATO E REIMPIEGATO

Il calore di scarto può quindi rappresentare una soluzione per questo contesto, in particolare per il riutilizzo nelle vertical hydroponic farm e nell'essiccazione dei cereali e dei foraggi.

Il calore che può essere recuperato e reimpiegato in altre applicazioni è dato dall'equazione (3.2.2.1)(Ashraf et al., 2026):

$$Q_{rec} = P_{elettrica} \cdot f_{rec} \cdot hx$$

In questo caso, f_{rec} indica la frazione del calore della struttura teoricamente recuperabile e dipende dalla **tecnologia di raffreddamento utilizzata**. Per i sistemi più avanzati, come il raffreddamento ad immersione in un liquido, il potenziale di recupero equivale a 0,8 (Yuan et al., 2023), mentre, nei sistemi di raffreddamento ad aria, in cui il calore viene prelevato dai corridoi caldi, la frazione di calore recuperabile si attesta tra 0,25 e 0,45 (Orò et al., 2019). Nel caso del data center a Caselle Torinese, se si considera quanto affermato dal Piano Particolareggiato del 2024, data l'adozione della tecnologia di raffreddamento ad immersione (tank cooling), si ipotizza che il potenziale di recupero sia pari a 0,8.

Il parametro ηhx corrisponde invece all'efficienza dello scambiatore di calore e del sistema di distribuzione. Questo valore dipende dai componenti termici utilizzati per il trasferimento e dalle eventuali dispersioni termiche lungo le tubazioni di rete. Secondo Ashraf et al. (2026), tale valore si attesta generalmente tra 0,6 e 0,95. In assenza di dati definitivi riguardo al sistema di distribuzione, si assume come valore per il caso studio ηhx=0,8, in considerazione dell'elevata efficienza termica del sistema a tank cooling.

La potenza termica recuperabile (Q_{rec}) risulta pertanto:

$$Q_{rec} = 252.000\ kW \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8 = 161.280\ kW \quad (3.2.2.1)$$

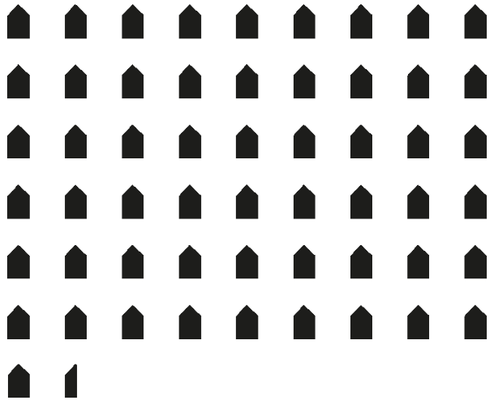
Mentre l'energia termica annuale recuperata (E_{rec}) può essere stimata utilizzando l'equazione (3.2.2.2) presentata nel capitolo 3.2.2:

$$E_{rec} = 161.280\ kW \cdot 8.760\ h = 1.412.812.800\ kWh/anno = 1.412.813\ MWh/anno$$

Questo valore dimostra che circa il **64% dell'energia consumata annualmente** (2.207.520 MWh) potrebbe essere recuperata e reimpiegata, ad esempio per reti di teleriscaldamento urbano, per utenze industriali limitrofe o in ambito agricolo.

523.264

IPOTETICHE ABITAZIONI RISCALDATE



Ogni icona equivale a 10.000 abitazioni. Possibili abitazioni riscaldabili attraverso l'energia termica recuperata. Elaborazione propria su dati Ashraf et al., 2026, e Città di Caselle Torinese, 2024.

In particolare, sulla base del consumo medio 2.700 kWh/anno per famiglia tipo indicato nel report di ARERA (2023) è possibile stimare a quante abitazioni equivale l'**energia termica annualmente recuperabile**:

n. abitazioni =1.412.813.000 kWh / 2.700 kWh = 523.264 abitazioni

(4.6.2.1)

Questo dato evidenzia concretamente il potenziale del *Waste Heat Recovery*: un'energia di tale entità, se non intercettata e reimpiegata, verrebbe dispersa nell'ambiente sotto forma di calore, con un impatto termico significativo sul microclima locale.

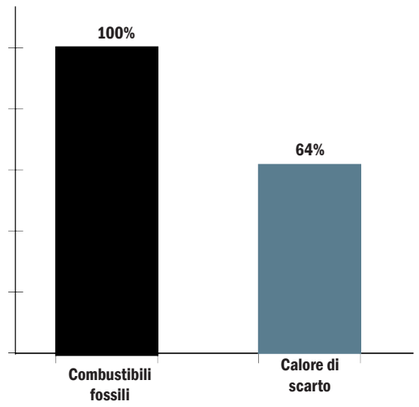
Tuttavia, come detto in precedenza, l'ipotesi del raffreddamento ad immersione, dalla quale deriva il valore *f rec* = 0,8, si basa sul sistema a tank cooling, descritto nel Piano Particolareggiato (Città di Caselle Torinese, 2024). La Variante Strutturale n. 3 sul Rapporto Ambientale della Città di Caselle Torinese (2026) descrive invece un sistema di raffreddamento a circuito chiuso con 232 chiller ad aria o acqua, le cui temperature operative dichiarate sono comprese tra 18°C e 28°C, nettamente differenti dal caso precedente. Per cui il valore f rec adottato potrebbe rappresentare uno scenario ottimistico. Quindi, nel caso venisse adottato un sistema di raffreddamento a chiller tradizionale il valore f rec dovrebbe essere inferiore e, di conseguenza, dovrebbero essere nuovamente verificati i valori di Q rec e E rec. Questa tipologia di raffreddamento potrebbe inoltre richiedere l'integrazione di pompe di calore per innalzare il livello termico del calore recuperato fino alle soglie richieste dalle applicazioni previste. Nonostante questa differenza tecnologica, il Rapporto Ambientale dichiara per il data center di Caselle Torinese un potenziale di calore di scarto pari a 1.450.000 MWh/anno, valore simile alla stima condotta in questo paragrafo sulla base del sistema immersion cooling. Resta dunque da verificare, con dati di progetto più definitivi, quale frazione di questo calore sia effettivamente disponibile senza ricorrere all'utilizzo pompe di calore per innalzare la temperatura del calore, qualora venga confermato l'utilizzo di un sistema di raffreddamento a chiller.

Il Piano Particolareggiato del 2024 afferma inoltre che il calore di scarto potrebbe essere riutilizzato nel teleriscaldamento urbano. Tuttavia, i comuni di Caselle Torinese e San Maurizio Canavese non sono attualmente dotati di una rete di teleriscaldamento. La realizzazione del data center potrebbe comunque rappresentare un incentivo concreto per valutarne l'introduzione, in una prospettiva di pianificazione energetica integrata del territorio.

4.6.2.1
Agire sul presente:
Essiccazione dei cereali

-36%

PERCENTUALE DI RISPARMIO ENERGETICO NEI PROCESSI DI ESSICCAZIONE RISPETTO AI COMBUSTIBILI FOSSILI





Per quanto riguarda la proposta progettuale, si è valutato l'inserimento di edifici per l'essiccazione dei cereali. L'utilizzo del calore di scarto per l'essiccazione dei cereali, come descritto nel capitolo 4.3.1, comporterebbe un consumo di combustibili fossili minore per questo processo, una riduzione della perdita del raccolto e una soluzione al problema fitosanitario. In questo caso la temperatura del calore di scarto in ingresso deve attestarsi tra i 50 e i 70°C (Chen et al., 2024). Questa temperatura è facilmente raggiungibile dal calore di scarto recuperato con un sistema di raffreddamento a tank cooling; tuttavia, nel caso in cui il sistema fosse a chiller, richiederebbe l'utilizzo della pompa di calore, comportando però un consumo elettrico aggiuntivo.

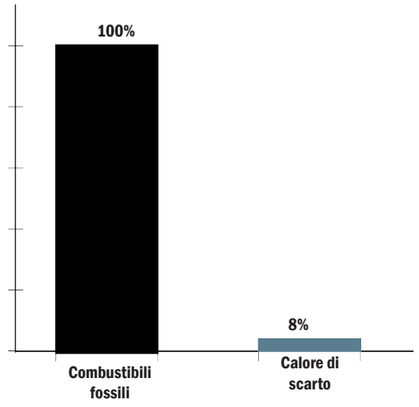
4.6.2.2
Agire sul futuro:
Vertical hydroponic farming

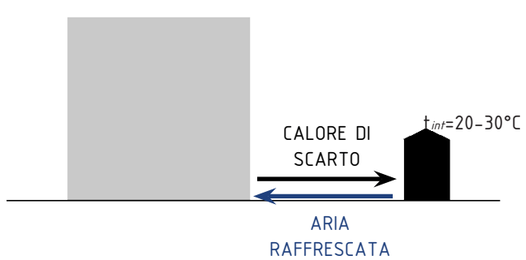
-92%

PERCENTUALE DI RISPARMIO IDRICO RISPETTO ALL'AGRICOLTURA TRADIZIONALE

2,7 x

PRODUZIONE AGRICOLA CON VERTICAL FARM RISPETTO ALL'AGRICOLTURA TRADIZIONALE





L'altra soluzione in vista della proposta progettuale sarebbe quella di inserire delle ***vertical farm***. In questo caso, per ridurre al minimo il consumo energetico, è necessario che queste siano delle strutture in **vetro**, così da utilizzare solamente luce solare diretta. Il calore di scarto permette di mantenere una temperatura costante anche nei mesi più avversi. Questo processo, come descritto nel capitolo 3.3.2, potrebbe rappresentare una **simbiosi industriale** in cui il calore entra nelle vertical farm e le piante, di conseguenza, abbassano la temperatura dell'aria, che può essere reimmessa nel data center. Questa strategia inoltre comporta un risparmio idrico notevole, in quanto riduce i consumi idrici del **92% rispetto all'agricoltura tradizionale** (Wang & Iddio, 2022), oltre a **ridurre il rischio di malattie fitosanitarie** e ad **aumentare il raccolto** annuo, grazie a una resa per unità di superficie superiore rispetto a un campo agricolo tradizionale (Borland et al., 2023). Questa soluzione risulta particolarmente promettente poiché il calore disperso in atmosfera e l'elevato consumo idrico del data center rappresentano due realtà distinte che, sommate, avrebbero un effetto fortemente compromettente sulle realtà agricole circostanti.

5. CONVIVERE: NUOVE ECOLOGIE TERRITORIALI

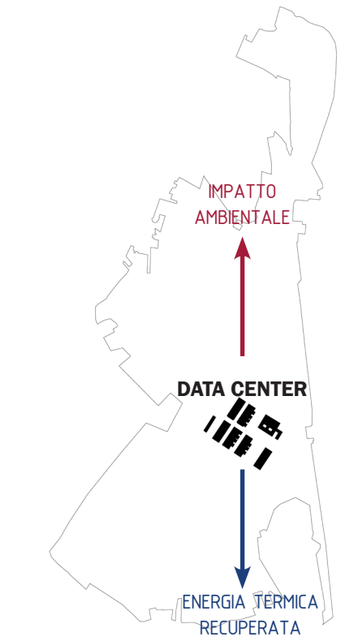
5.1 LA STRATEGIA

5.2 IL MASTERPLAN

5.3 LE SCELTE VEGETAZIONALI: OLTRE IL LIMITE AEROPORTUALE

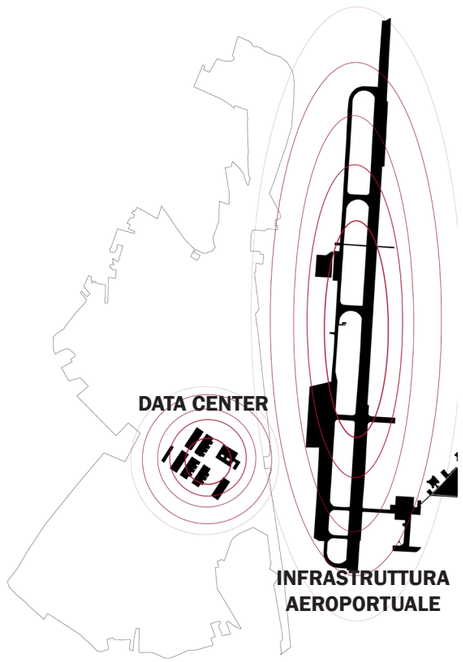
5.4 APPROFONDIMENTI

IMPATTO AMBIENTALE



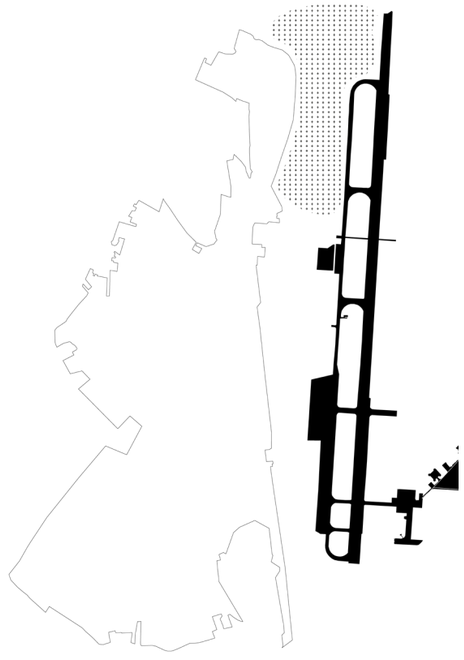
Data center
Area di progetto

RUMORE



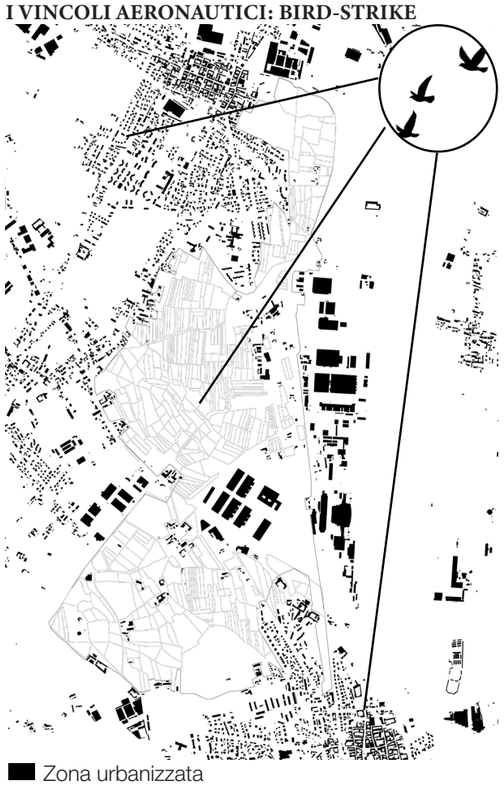
Sorgente di rumore
Propagazione del rumore
Area di progetto

L'INFRASTRUTTURA AEROPORTUALE



Aeroporto
Ampliamento scalo aeroportuale entro il 2032
Area di progetto

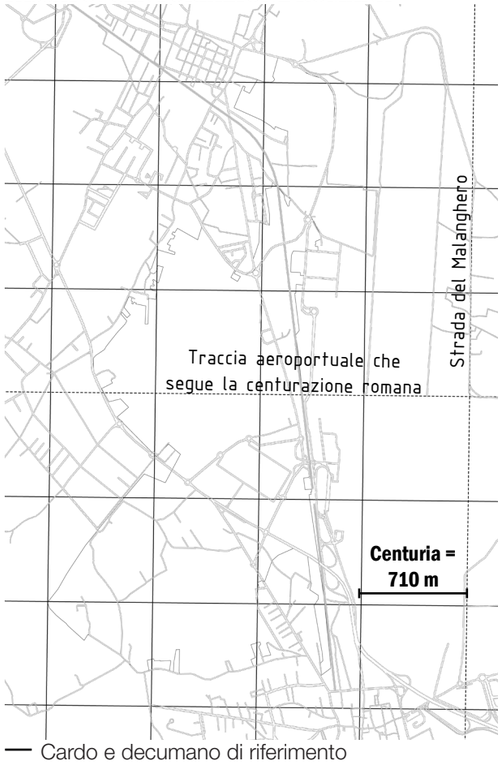
I VINCOLI AERONAUTICI: BIRD-STRIKE



Zona urbanizzata
Campo agricolo
Area di progetto

5.1 LA STRATEGIA

PASSATO: CENTURIAZIONE ROMANA



Cardo e decumano di riferimento
Centuria
Viabilità
Area di progetto

PRESENTE: LA TRAMA AGRICOLA



Campo agricolo
Area di progetto

Dai risultati emersi dalle analisi precedenti si evidenzia un territorio fortemente antropizzato. Questa condizione è determinata dall'infrastruttura aeroportuale, dai campi agricoli e dalla nuova infrastruttura digitale in fase di realizzazione.

L'analisi sull'impatto ambientale ha messo in luce gli elevati consumi che deriveranno dalla realizzazione di questo data center, tra consumo energetico, idrico, emissioni di CO_2 e calore generato. Una prima fase di ricerca si è quindi basata sulla verifica delle risorse naturali disponibili sul territorio attraverso le fonti rinnovabili, evidenziandone i limiti e l'insufficienza rispetto al fabbisogno richiesto dal data center. Considerando una improbabile autosufficienza energetica, la ricerca si è spostata sulla possibilità di creare nuove relazioni territoriali, intervenendo con il free cooling e, in particolare, con il recupero del calore di scarto e le sue relazioni con la produttività agricola. È possibile così constatare come il data center non sia solo un consumatore, ma anche un potenziale produttore di energia termica che, una volta recuperata, può essere applicata alla realtà agricola di Caselle Torinese e San Maurizio Canavese.

D'altra parte, l'analisi cartografica ha evidenziato i limiti legati all'infrastruttura aeroportuale, connessi al rischio di bird strike. Da quest'ultima analisi è emerso come l'habitat preferenziale per il foraggiamento e la nidificazione delle specie ornitiche sia proprio quello dei campi agricoli, ovvero l'attuale territorio. Questo ha portato alla configurazione di nuove forme di naturalità controllata e progettata, introducendo nuovi spazi ecologici in un territorio fortemente antropizzato.

Infine, l'analisi storica ha rivelato che il territorio agricolo era già presente in epoca romana, con la centuriazione di Caselle. Attraverso l'identità del luogo, sia quella passata, la centuriazione, sia quella attuale, la trama agricola, la cui struttura diventa la matrice del progetto.

OBIETTIVI

01

CONVIVERE CON I VINCOLI

RIDURRE IL RISCHIO DI BIRD STRIKE CON STRATEGIE AMBIENTALI E UNA SELEZIONE VEGETALE MIRATA

02

INTERVENIRE SUI METABOLISMI DEL DATA CENTER

IL CALORE DI SCARTO DEL DATA CENTER VIENE RECUPERATO E TRASFORMATO IN ENERGIA TERMICA

03

CREARE NUOVE RELAZIONI ECOLOGICHE

IL CALORE DI SCARTO DEL DATA CENTER ALIMENTA NUOVE FILIERE DELL'AGRICOLTURA INTELLIGENTE

04

UNIRE LE DUE IDENTITÀ DEL TERRITORIO

INTRECCIARE LA CENTURIAZIONE ROMANA E I CAMPI AGRICCOLI ATTUALI, TRA PASSATO E PRESENTE

05

COLLEGARE

CREARE CONNESSIONI INTERCOMUNALI, CON L'AEROPORTO, CON IL CENTRO CITTÀ E CON I TERRITORI AD OGGI ISOLATI

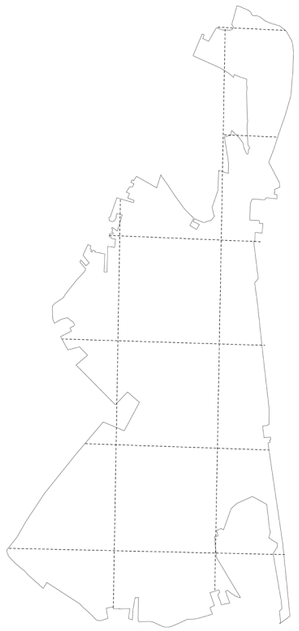
06

RESTITUIRE LO SPAZIO ALLE PERSONE

SPAZI PUBBLICI E COLLEGAMENTI CICLO-PEDONALI IN UN TERRITORIO OGGI QUASI PRIVO DI FRUIZIONE

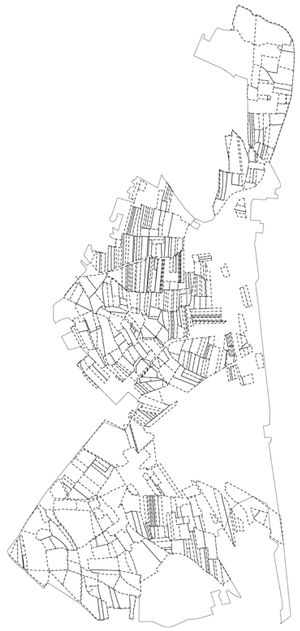
CONCEPT

1.LA CENTURIAZIONE ROMANA



Centuria
Area di progetto

2. LA TRAMA AGRICOLA ATTUALE



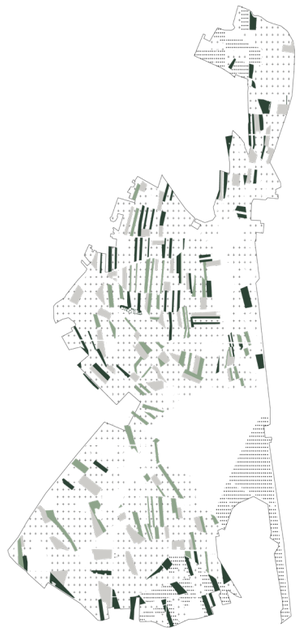
Campo agricolo
Area di progetto

3. IL PERCORSO PRINCIPALE



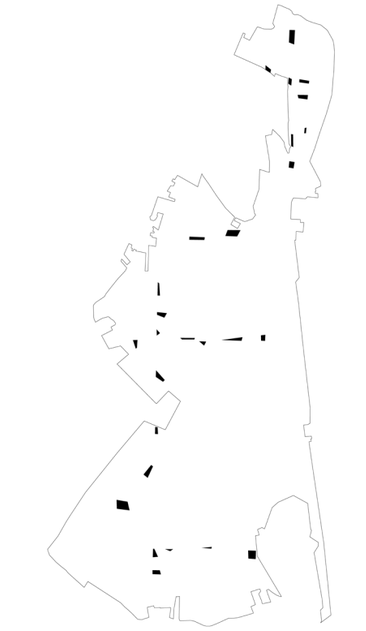
Percorso principale
Area di progetto

4. TIPOLOGIE DI AREE



Area boscata
Area forestale d'infiltrazione
Prato alto
Prato libero
Seminativo

5. FUNZIONI



Funzione ricreativa attiva e passiva
Area di progetto

6. NUOVE STRATEGIE DI AGRICOLTURA INTELLIGENTE



Funzione produttiva
Area di progetto

La **centuriazione di Caselle**, ovvero il sistema romano di suddivisione e assegnazione dei terreni agricoli, diventa il punto di partenza dell'idea progettuale. La sua trama è tutt'oggi visibile in alcune porzioni dei campi agricoli e nell'orientamento della pista aeroportuale. Si parte dunque dal disegno di una griglia ortogonale, assumendo come cardo di riferimento la Strada del Malanghero.

Il sistema di centurie viene reinterpretato in relazione alla **trama agricola** attuale. Attraverso la lettura del paesaggio circostante, le unità vengono deformate e riorientate sulla base dei campi agricoli esistenti. La nuova trama riproduce quindi, in alcuni tratti, il sistema romano e, in altri, i campi agricoli attuali, traducendo l'eterogeneità del paesaggio di Caselle Torinese e San Maurizio Canavese in un disegno dinamico.

La nuova trama accoglie tipologie di aree differenti: in sostituzione di alcune tessere agricole si inseriscono boschetti a ramificazione esile che, a causa dei vincoli aeroportuali, non attraggono avifauna, alternati ad aree forestali d'infiltrazione, a prati alti che rispettano la *long grass policy* e ad alcuni campi agricoli residui.

La centuriazione romana delinea invece, in alcuni tratti, il **percorso principale**, che talvolta viene interrotto e segue i lati delle tessere agricole, creando così una situazione dinamica.

A questi si sovrappongono due nuovi layer di **elementi puntuali**: da un lato, lungo il percorso, si inseriscono aree con funzione ricreativa, passiva e attiva, dall'altro, infrastrutture con funzione produttiva. I vincoli aeroportuali, infatti, sconsigliano l'inserimento di coltivazioni tradizionali a causa del rischio di bird strike, e la presenza del data center renderebbe comunque i campi agricoli tradizionali incompatibili con il contesto: il calore disperso nell'ambiente e il consumo idrico dell'infrastruttura digitale comprometterebbero la produzione agricola. La sottrazione dei campi tradizionali viene quindi compensata dall'inserimento puntuale di nuove strutture produttive: la vertical hydroponic farm ed edifici per l'essiccazione di cereali e foraggi, entrambi capaci di sfruttare il calore di scarto del data center. Gli agricoltori locali, esclusi dai campi a coltivazione tradizionale, diventano così i protagonisti di un nuovo sistema produttivo, definito come agricoltura intelligente.

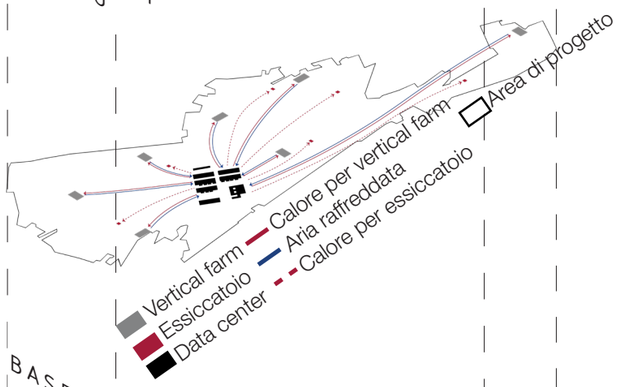


5.2 IL MASTERPLAN

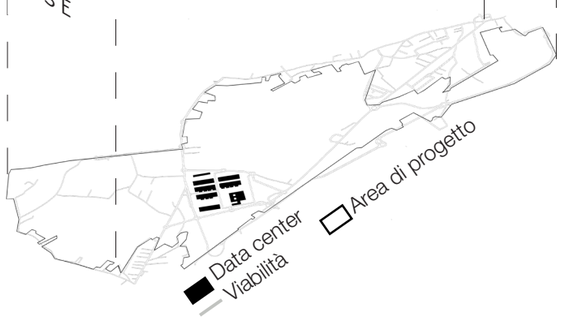
SISTEMA DELLE ACQUE



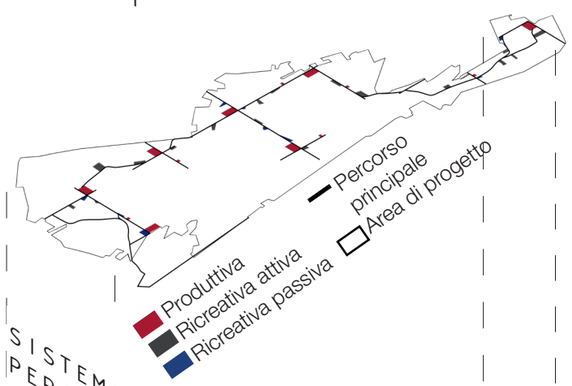
CALORE DI SCARTO



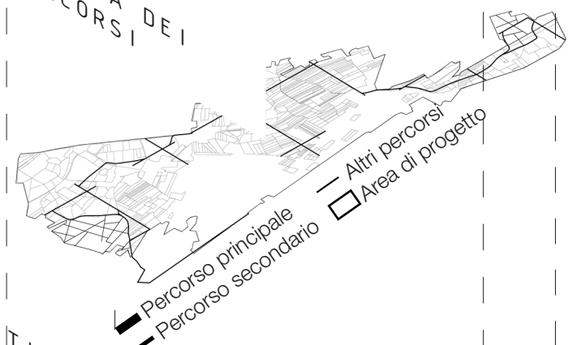
BASE



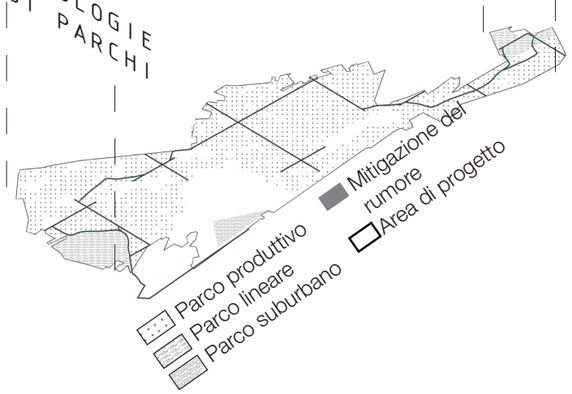
FUNZIONI

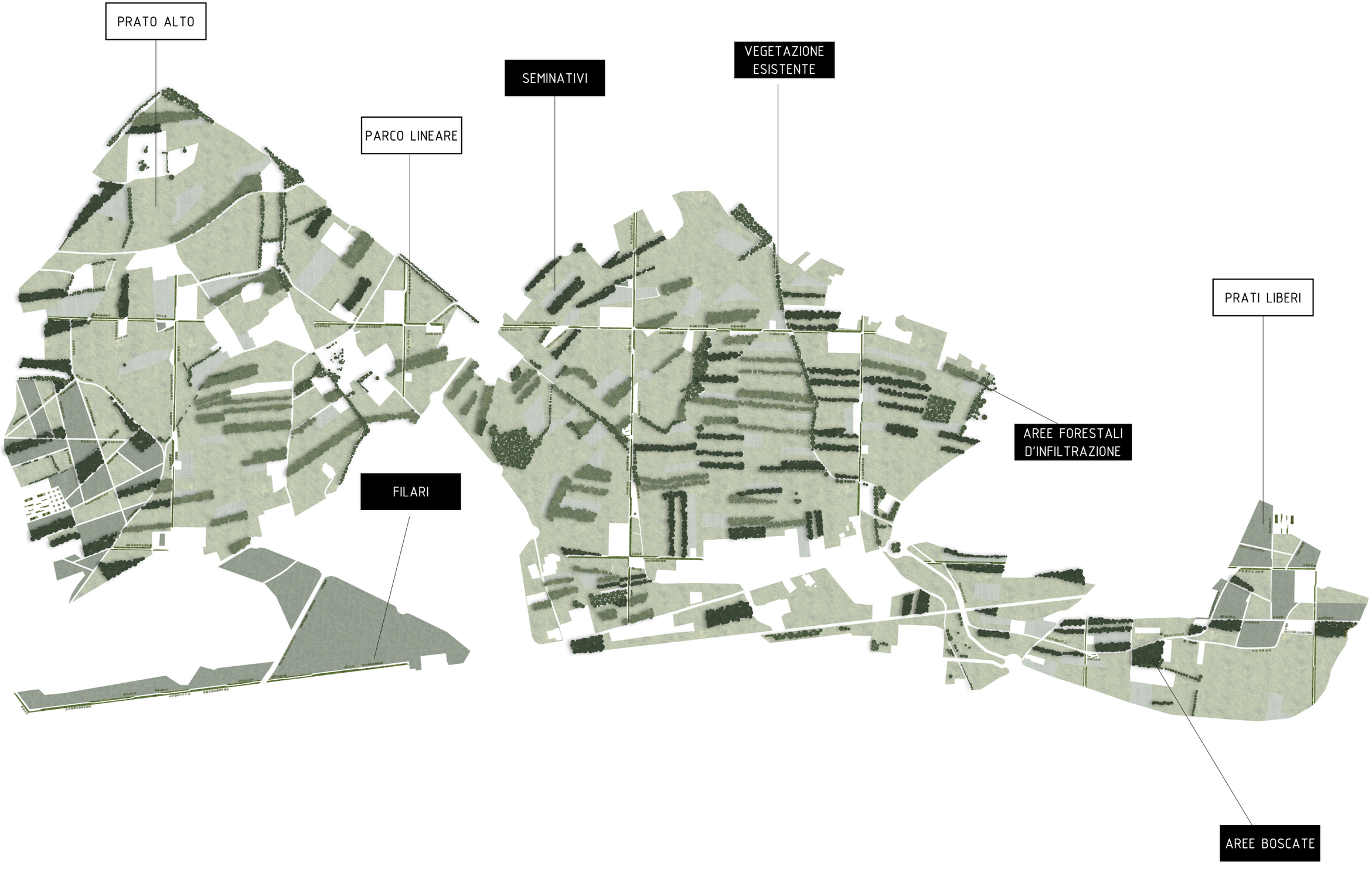


SISTEMA DEI PERCORSI



TIPOLOGIE DI PARCHI

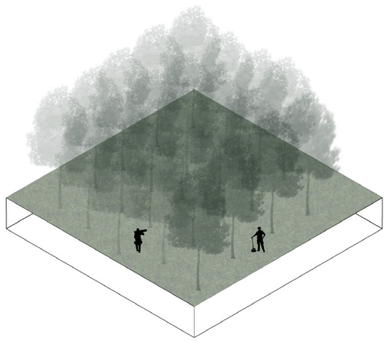




5.3 OLTRE IL LIMITE AEROPORTUALE: LA SCELTA VEGETAZIONALE

TIPOLOGIE DI AREE

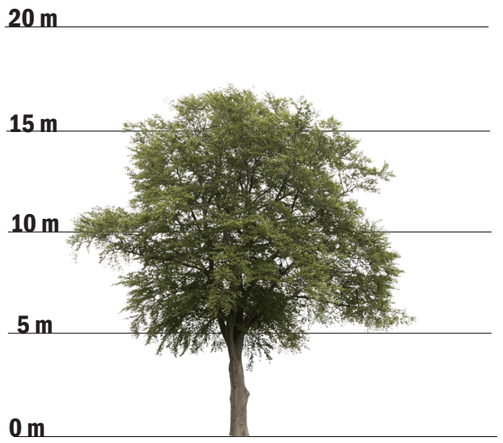
AREE BOSCATE



CRITERI DI SCELTA

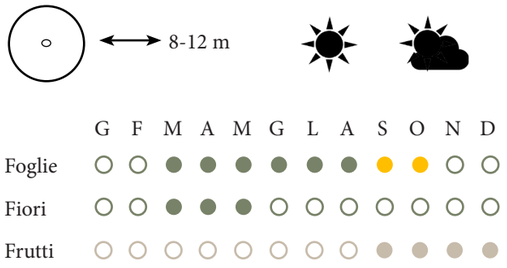
La **produttività agricola** viene ripresa anche nelle aree boscate. Questo elemento è fondamentale in quanto coincide con quanto affermato dal documento proposto dall'ENAC *Linee guida di valutazione per le fonti attrattive di fauna selvatica* (2009), in cui, per la vicinanza con l'aeroporto, gli alberi devono essere soggetti a continue potature in modo tale da ridurre la possibilità di nidificazione degli uccelli. Il legno prodotto dalle potature necessarie e dai tagli di altro tipo può quindi costituire una nuova tipologia di filiera produuttiva nel contesto di Caselle Torinese. La scelta vegetazionale, tuttavia, ha tenuto conto di alcuni fattori: da quelli derivati dall'impatto ambientale del data center, a quelli per la riduzione del rischio di bird strike fino ai limiti imposti dall'ENAC sulle altezze degli ostacoli in prossimità dell'aeroporto. Per quanto riguarda il primo punto, la scelta è stata indirizzata su piante autoctone che fossero resistenti all'inquinamento, al calore e alla siccità. Per ridurre il rischio di bird strike si sono privilegiate specie con infiorescenze e infruttescenze poco attrattive per l'avifauna e con ramificazioni esili, che non permettono la nidificazione delle specie ornitiche coinvolte negli impatti registrati nell'aeroporto di Caselle Torinese. Infine, si sono considerate le altezze relative Superfici di Limitazione degli Ostacoli (IHS), che nell'area del sito prevedono un massimo di 20-30 m in relazione alla quota.

SELEZIONE VEGETALE

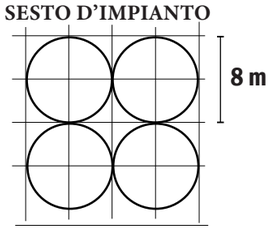


***Ostrya carpinifolia* Scop.**

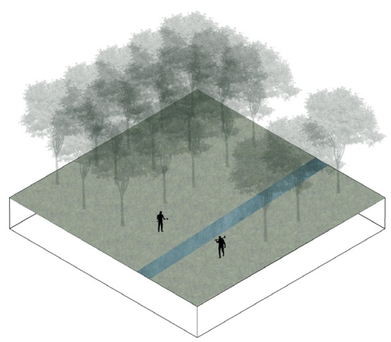
CARATTERISTICHE



SESTO D'IMPIANTO



AREE FORESTALI D'INFILTRAZIONE



CRITERI DI SCELTA

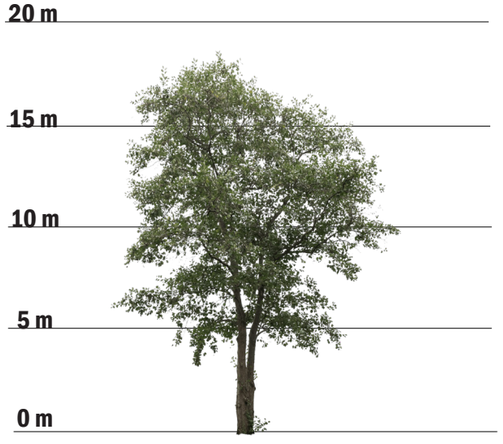
La **produttività agricol**a viene ripresa anche in questo contesto, che tuttavia si caratterizza principalmente come area forestale d'infiltrazione. L'acqua meteorica e quella proveniente dai canali viene infiltrata nel suolo e depurata attraverso l'apparato radicale degli alberi, giungendo così in falda in buone condizioni.

Questa strategia sfrutta la fitta rete di canali e scoline preesistenti, realizzati storicamente per l'irrigazione dei campi agricoli.

L'infiltrazione controllata assume particolare rilevanza in relazione all'elevato consumo idrico del data center: i boschi d'infiltrazione contribuiscono infatti a ricaricare la falda acquifera, compensando parzialmente il prelievo dell'infrastruttura e restituendo al territorio una risorsa altrimenti sottratta.

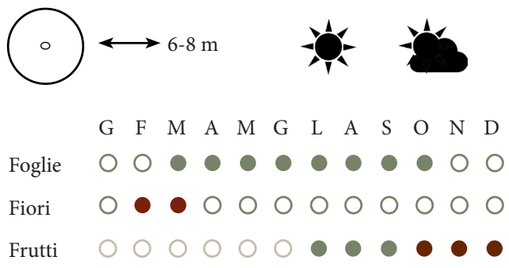
La scelta vegetazionale segue i criteri già descritti: autoctonia, ridotta attrattività per l'avifauna a rischio bird strike, rispetto dei limiti ENAC, integrati ad un ulteriore requisito, ovvero la tolleranza all'allagamento periodico e la capacità fitodepurativa dell'apparato radicale.

SELEZIONE VEGETALE

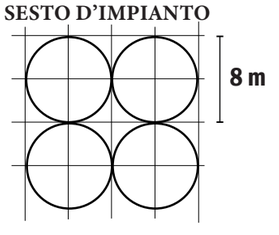


***Alnus incana* L.**

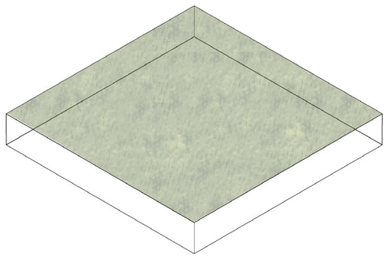
CARATTERISTICHE



SESTO D'IMPIANTO



AREE A PRATO ALTO

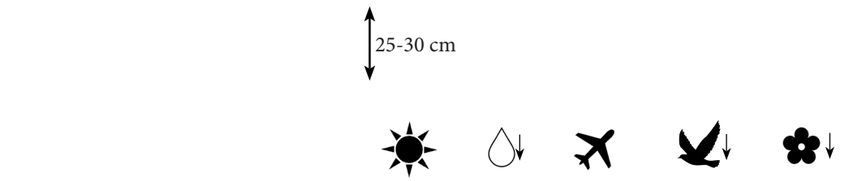


Le aree a prato alto rispettano la long grass policy, una strategia di gestione del verde adottata in prossimità delle infrastrutture aeroportuali per ridurre l'attrattività nei confronti della fauna selvatica, in particolare delle specie ornitiche. Mantenendo l'altezza dell'erba tra i 20 e i 30 cm, si limita la visibilità e l'accessibilità del suolo, scoraggiando il foraggiamento e la nidificazione degli uccelli e diminuendo così il rischio di bird strike. Il prato inoltre richiede una manutenzione più contenuta, riducendo gli sfalci periodici a favore di una gestione estensiva del verde, coerente con l'obiettivo di contenere l'impatto ambientale del progetto.

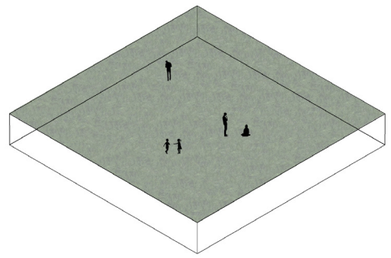
SELEZIONE VEGETALE

Miscuglio prativo tipico delle zone aeroportuali, composto da:
- 60% di *Festuca arundinacea*
- 20% di *Dactylis glomerata*
- 10% di *Phleum pratense*
- 10% di *Festuca rubra*

CRITERI DI SCELTA



AREE A PRATO LIBERO



I prati liberi vengono collocati solamente nelle aree suburbane, quelle più vicine al centro abitativo e che, per questo motivo, devono avere degli spazi per la fruizione libera e attiva. La loro altezza si attesta intorno ai 5-8 cm e, anche in questo caso, si è selezionato un miscuglio in grado di mitigare la presenza di avifauna.

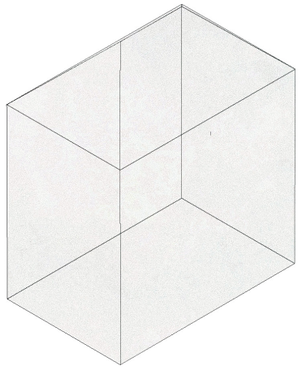
SELEZIONE VEGETALE

I prati liberi vengono collocati solamente nelle aree suburbane e in alcune aree con funzione ricreativa libera. Il miscuglio selezionato è composta da:
- 80% di *Festuca arundinacea*
- 10% di *Lolium perenne*
- 10% di *Poa pratensis*

CRITERI DI SCELTA



VERTICAL FARM



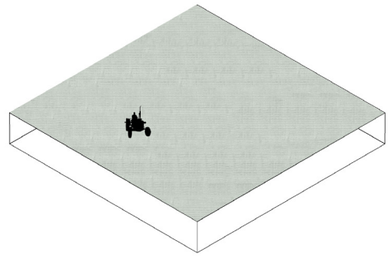
In questo contesto si delinea una nuova tipologia di agricoltura, definibile come **Agricoltura Intelligente**, in cui i coltivatori tradizionali abbracciano un sistema produttivo più moderno. Alcuni campi agricoli tradizionali vengono sostituiti dalle vertical farm che, oltre a rappresentare una soluzione al problema emerso dall'analisi sul rischio di bird strike (secondo la quale l'habitat di preferenza delle specie ornitiche rilevate era proprio quello dei campi agricoli), garantiscono anche una resa produttiva maggiore, un risparmio idrico del 92% rispetto all'agricoltura tradizionale e una riduzione dei problemi fitosanitari.

Questa tecnologia innovativa, utilizza solitamente un'illuminazione a LED per massimizzare la resa produttiva, in questo caso, invece, si è scelto di sfruttare la **luce naturale** per ridurre al minimo il consumo energetico. Nei mesi più avversi si instaura una sinergia con il data center: le vertical farm utilizzano il calore di scarto generato dall'infrastruttura digitale e, in cambio, le piante attraverso la traspirazione abbassano la temperatura delll'aria che viene reimmessa nel data center.

Le vertical farm, oltre ad assumere una funzione produttiva, ricoprono anche uno scopo didattico e di fruizione pubblica.

Si tratta quindi di una struttura in vetro che utilizza l'illuminazione naturale e la produzione viene suddivisa su scaffali da 8 piani ciascuno:
- **livello superiore** (massima esposizione luminosa) che integra i piani 7-8 prevede la coltivazione di erbe aromatiche mediterranee come il basilico, origano, timo, salvia, rosmarino e menta
- **livello intermedio** (luce media) per i piani dal quarto al sesti in cui vengono coltivati ortaggi a foglia come la lattuga, rucola, valeriana e radicchio
- **livello inferiore** (luce diffusa) per i piani dal primo al terzo, con spinaci, bietole, cavolo nero e coste, che sono specie tolleranti la mezzombra

SEMINATIVI

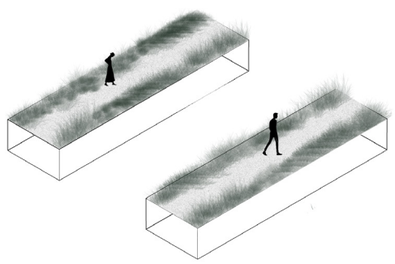


I **campi agricoli** vengono mantenuti, ma in percentuale ridotta, per permettere agli agricoltori una tipologia di coltivazione ancora tradizionale. Questa sostituzione dei campi agricoli con altre tipologie di aree, come le aree boscate e i prati ad altezza elevata, è stata motivata dall'analisi sul rischio di bird strike, dalla quale è emerso che l'habitat più favorevole per le specie ornitiche in questione, per il foraggiamento e la nidificazione, è proprio quello agricolo.

Si sono quindi mantenuti, in numero molto minore, i campi agricoli per la coltivazione di cereali e foraggi per il bestiame. In questo modo si sono inseriti anche edifici per l'**essiccazione di cereali e foraggi**, che vengono alimentati dal calore di scarto del data center e non più da combustibili fossili.

La filiera produttiva è dunque rispettata anche in questo caso.

PERCORSI



I percorsi principali si distinguono in due tipologie diverse:
- quelli che ripercorrono la **centuriazione romana**, larghi 10 m, con vegetazione
- quelli che seguono l'andamento della **trama agricola** attuale, di larghezza 5 m, privi di vegetazione

SELEZIONE VEGETALE

I percorsi che seguono le centurie romane, ospitano lungo i lati delle specie vegetali selezionate:

Carex flacca

25-30 cm



Carex divulsa

5-60 cm



Festuca glauca

30-50 cm



Rosmarinus officinalis

0,5-1 m



5.4 GLI APPROFONDIMENTI

5.4.1

La mitigazione del rumore



IL SISTEMA DI MITIGAZIONE E L'INFRASTRUTTURA AEROPORTUALE



Sezione AA' (1: 2.000)

IL SISTEMA DI MITIGAZIONE E IL DATA CENTER



Sezione BB' (1: 2.000)

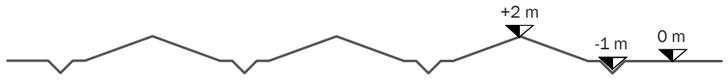
IL SISTEMA DI MITIGAZIONE





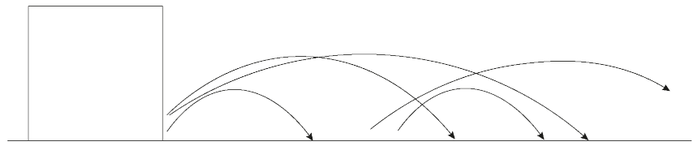
Sezione CC' (1: 1.000)

I MOVIMENTI DI TERRA

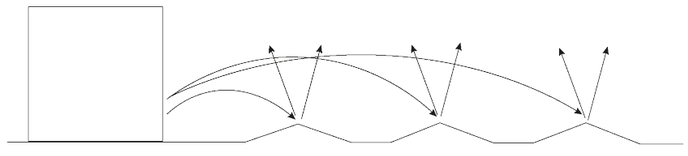


Sezione DD' (1: 500)

PROPAGAZIONE RUMORE SENZA MITIGAZIONE



PROPAGAZIONE RUMORE CON MITIGAZIONE



5.4.2

Il sistema di parchi sub-urbani



LE DIVERSE TIPOLOGIE DI AREE

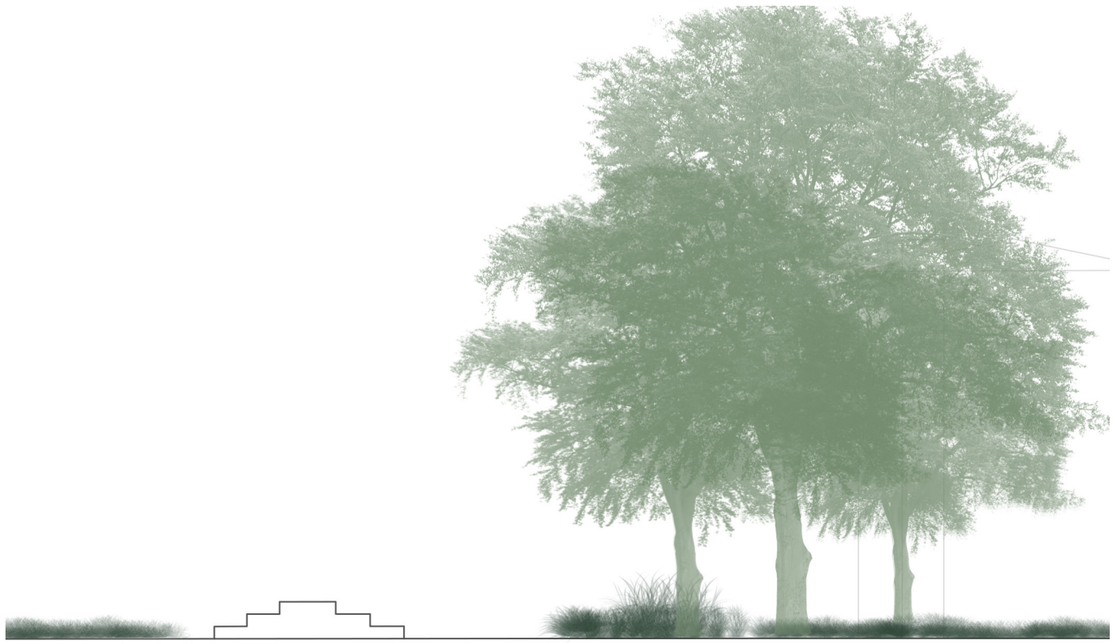


Sezione AA’ (1: 2.000)

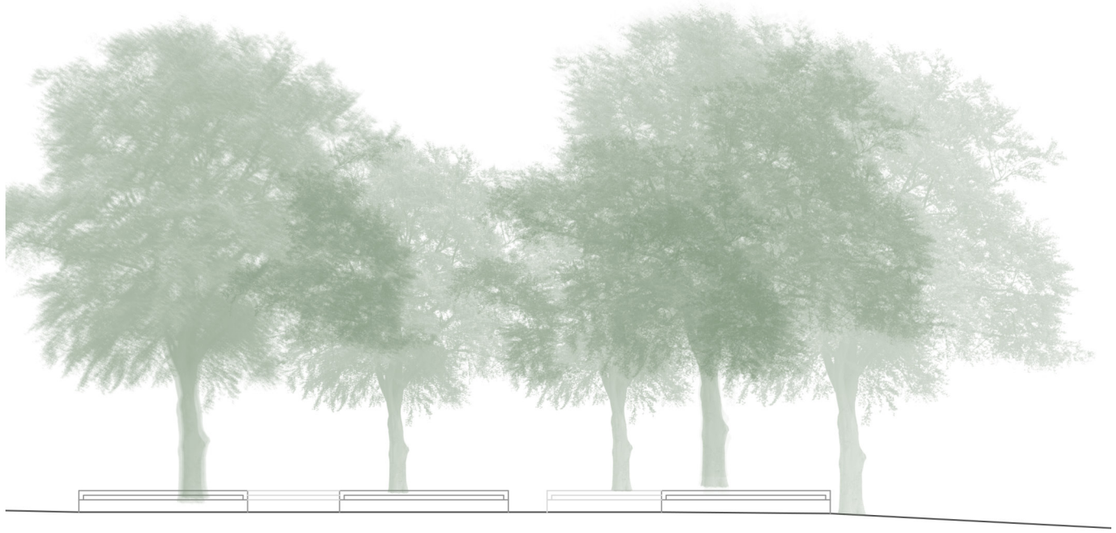


Sezione BB’ (1: 500)

LE AREE DI SOSTA



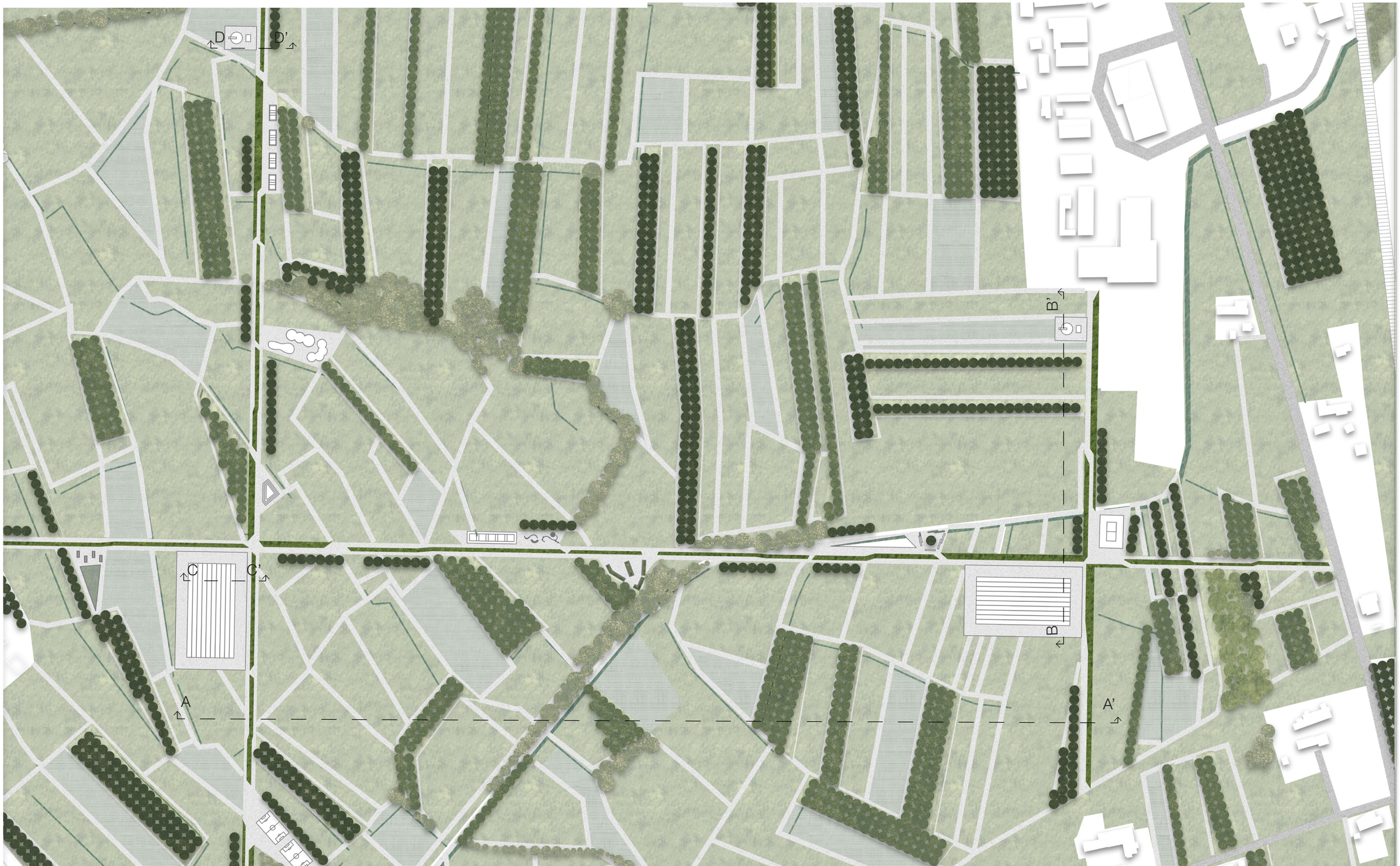
Sezione CC’ (1: 200)



Sezione DD’ (1: 200)

5.4.3

Il parco produttivo



IL CONTESTO

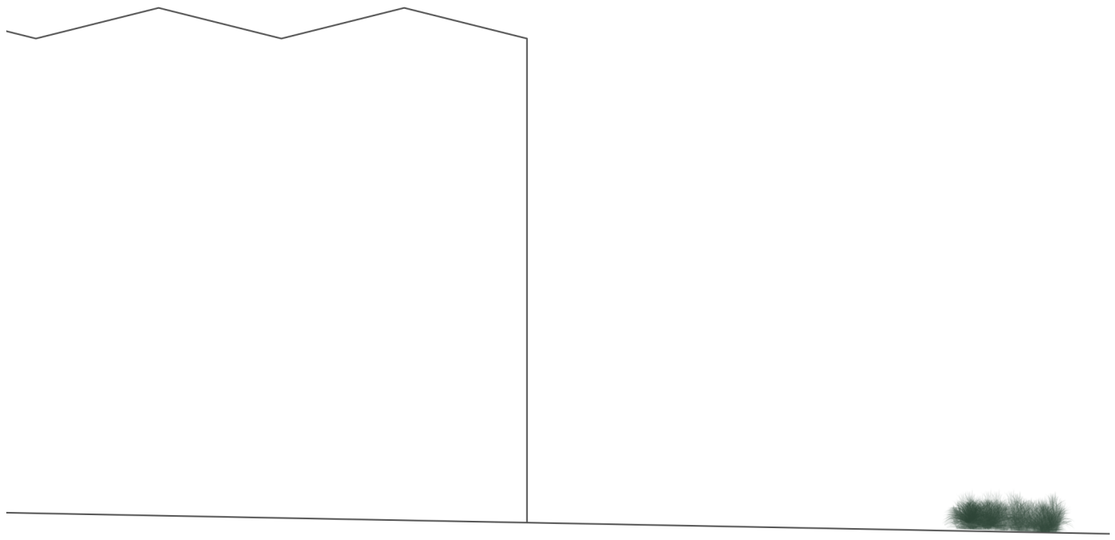


Sezione AA’ (1: 2.000)



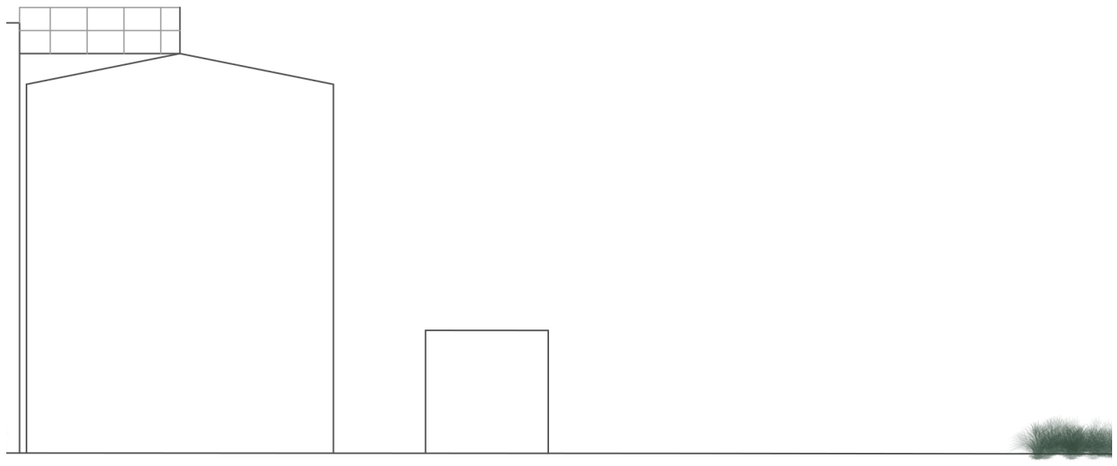
Sezione BB’ (1: 500)

LA VERTICAL FARM E IL PERCORSO PRINCIPALE



Sezione CC’ (1: 200)

L’ESSICCATORE E IL PERCORSO PRINCIPALE



Sezione DD’ (1: 200)

6. GLI SCENARI POSSIBILI

6.1 SOTTRARRE

6.2 RESISTERE

6.3 SFRUTTARE

6.4 CONVIVERE



Il fabbisogno idrico del data center sottrae al territorio l'acqua necessaria all'agricoltura, mentre il calore disperso in atmosfera dai sistemi di raffreddamento genera una vera e propria isola di calore. Se non si interviene con nuove soluzioni, il suolo si inaridisce, la vegetazione scompare e il paesaggio rurale si trasforma progressivamente in un ambiente desertico e privo di vita.

6.1 SOTTRARRE



Anche nel caso in cui il calore di scarto venisse recuperato, il consumo idrico dell'infrastruttura, sovrapposto a quello dell'agricoltura tradizionale, continuerebbe ad incidere sul territorio circostante. Le coltivazioni proverebbero a resistere in un paesaggio sempre più difficile, crescendo rade e sofferenti, segno di uno stress idrico persistente. Inoltre, la scelta di mantenere i campi agricoli tradizionali, senza considerare la vicinanza dell'aeroporto, genererebbe un rischio concreto di bird strike: i terreni coltivati continuerebbero infatti ad attrarre l'avifauna.

6.2 RESISTERE



Per soddisfare il fabbisogno energetico del data center attraverso le fonti rinnovabili, l'intera superficie agricola verrebbe sostituita da una distesa infinita di pannelli fotovoltaici, la cui estensione risulterebbe teoricamente 1,7 volte superiore all'area di progetto. Lo sfruttamento dei campi agricoli come risorsa energetica risolverebbe il problema dell'approvvigionamento, ma cancellerebbe l'identità agricola del territorio: il paesaggio scomparirebbe sotto un unico e infinito impianto fotovoltaico, che non si limiterebbe ad occupare il suolo agricolo esistente, ma ne eccederebbe ampiamente i confini.

6.3 SFRUTTARE



Il calore di scarto del data center viene recuperato per alimentare la filiera produttiva, come l'essiccazione di cereali e foraggi, e le vertical farm, che, come dimostrato dalla ricerca, garantiscono un risparmio idrico del 92% e un aumento della produzione agricola di 2,7 volte rispetto ai sistemi tradizionali, sostituendo progressivamente i campi agricoli e generando nuove ecologie sul territorio. Il percorso principale è affiancato talvolta da aree boscate e d'infiltrazione, talvolta da prati alti secondo i principi della *long grass policy* o da funzioni specifiche lungo il tracciato. La vicinanza dell'aeroporto impone tuttavia una naturalità controllata: le specie vegetali vengono selezionate non per la loro ricchezza ecologica assoluta, ma per il basso profilo di attrattività nei confronti dell'avifauna, riducendo il rischio di bird strike. Si identifica quindi un mosaico paesaggistico differenziato che dimostra come infrastruttura digitale, agricoltura intelligente e territorio possano convivere in nuove ecologie territoriali.

6.4 CONVIVERE

conclusioni

Il percorso di questa tesi è partito dalla constatazione che dietro ogni dato si nasconde un'infrastruttura fisica, non un'entità immateriale e priva di peso, per arrivare a interrogare, attraverso il caso di Caselle Torinese, quale ruolo possa avere il progetto di paesaggio di fronte a un'infrastruttura digitale di scala industriale che si inserisce in un territorio già stratificato e antropizzato. La tesi si è sviluppata attraverso quattro fasi: l'analisi dell'impronta ambientale del data center, la ricerca di nuove soluzioni, lo studio puntuale del territorio di Caselle Torinese e, infine, la proposta progettuale delle nuove ecologie territoriali, per giungere al capitolo conclusivo sugli scenari possibili.

Questi mostrano le diverse condizioni che il data center potrebbe generare. Nello scenario Sottrarre, il fabbisogno idrico che il data center sottrae all'agricoltura e il calore disperso nell'ambiente portano a un progressivo inaridimento dei campi, fino a trasformare il paesaggio rurale in un ambiente desertico e privo di vita. Lo scenario Resistere mostra quanto anche un intervento parziale, il solo recupero del calore di scarto, senza affrontare il consumo idrico né il rapporto tra colture tradizionali e rischio aeroportuale, possa costituire una minaccia per il paesaggio agricolo attuale: le coltivazioni risultano rade e sofferenti, segno di uno stress idrico persistente, mentre il mantenimento delle colture tradizionali continua a generare un rischio concreto di bird strike. Lo scenario Sfruttare porta alle estreme conseguenze il tentativo di soddisfare il fabbisogno energetico del data center attraverso le sole fonti rinnovabili, che richiederebbe una distesa di pannelli fotovoltaici pari a 1,7 volte l'area di progetto. Lo scenario Convivere, infine, coincide con la proposta progettuale della tesi: il calore di scarto del data center, recuperato e reindirizzato verso l'essiccazione di cereali e foraggi e verso la vertical hydroponic farming, garantisce un risparmio idrico e un aumento della produzione agricola.

In questo scenario, i vincoli aeroportuali orientano attivamente la selezione vegetale e la configurazione degli spazi, riducendo il rischio di bird strike senza rinunciare alla ricchezza del mosaico paesaggistico. La trama storica della centuriazione, riletta e reinterpretata in relazione ai campi agricoli attuali, diventa infine la matrice generatrice del disegno, restituendo al territorio quell'identità che, negli altri tre scenari, veniva progressivamente cancellata.

Il confronto tra i quattro scenari dimostra così che la convivenza tra infrastruttura digitale, aeroporto e paesaggio agricolo è possibile attraverso la costruzione di nuove ecologie territoriali. Su questa base, la tesi risponde alla domanda di ricerca posta in apertura: il progetto di paesaggio può ridefinire la relazione tra infrastruttura digitale, sistema agricolo e vincoli aeroportuali non mitigando semplicemente gli impatti del data center, ma leggendone le contraddizioni, tra ciò che consuma e ciò che potrebbe restituire, come materiale progettuale a partire dal quale costruire nuove relazioni territoriali.

In questo senso, il lavoro svolto per Caselle Torinese dimostra che, di fronte a infrastrutture digitali destinate a moltiplicarsi nei prossimi anni in territori spesso ancora agricoli o periurbani, il progetto di paesaggio non può limitarsi a un ruolo di mitigazione degli impatti, né può rinunciare a intervenire lasciando che sia l'infrastruttura, da sola, a determinare il destino del territorio. Le contraddizioni generate da queste infrastrutture, tra consumo e restituzione, tra limite e possibilità, sono alla base della proposta progettuale volta a realizzare nuove ecologie territoriali: non necessariamente migliori o più sostenibili in senso assoluto, ma capaci di tenere insieme sistemi che, altrimenti, rischierebbero di restare compromessi.

bibliografia

Alkrush, A. A., Salem, M. S., Abdelrehim, O., & Hegazi, A. A. (2024). Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions. *International Journal of Refrigeration, 160, 246–262*. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.02.007

Apple. (2024). *Environmental responsibility report* (p. 50). Apple. https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_Environmental_Progress_Report_2024.pdf

ARERA – Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente. (2023). *Aggiornamento delle condizioni economiche del servizio di tutela per i clienti domestici – III trimestre 2023*. https://www.arera.it/fileadmin/allegati/schede/230628st.pdf

Ashraf, M., Ibrahim, I., & Untaroiu, A. (2026, March 9–12). *Toward sustainable digital infrastructure: Thermal and economic potential of data center heat reuse* [Paper presentation]. 11th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC), Arizona State University, Tempe, AZ, United States. Paper No. TFEC-2026-61484.

Bansode, P. V., Shah, J. M., Gupta, G., Agonafer, D., Patel, H., Roe, D., & Tufty, R. (2018). Measurement of the thermal performance of a single-phase immersion cooled server at elevated temperatures for prolonged time. In *ASME 2018 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems* (V001T02A010). ASME. https://doi.org/10.1115/IPACK2018-8432

Barickman, T. C., Olorunwa, O. J., Sehgal, A., Walne, C. H., Reddy, K. R., & Gao, W. (2021). Yield, physiological performance, and phytochemistry of basil (*Ocimum basilicum* L.) under temperature stress and elevated CO_2 concentrations. *Plants, 10*(6), 1072. https://doi.org/10.3390/plants10061072

Barroso, L. A., Hölzle, U., & Ranganathan, P. (2019). *The datacenter as a computer: Designing warehouse-scale machines* (3rd ed., pp. 1–6). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-01761-2

Barroso, L. A., Hölzle, U., & Ranganathan, P. (2026). *The datacenter as a computer: Designing warehouse-scale machines* (4th ed., pp. 5, 11–16, 79–113, 123–124, 194, 215). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-99489-0

Bawden, T. (2016, September 23). Global warming: Data centres to consume three times as much energy in next decade, experts warn. *The Independent*. https://www.independent.co.uk/climate-change/news/global-warming-data-centres-to-consume-three-times-as-much-energy-in-next-decade-experts-warn-a6830086.html

Belady, C., Rawson, A., Pfleuger, J., & Cader, T. (2008). *Green grid data center power efficiency metrics: PUE and DCIE*. The Green Grid.

Belady, C., Azevedo, D., Patterson, M., Pouehe, J., & Tipley, R. (2010). *Carbon usage effectiveness (CUE): A green grid data center sustainability metric* (Technical Report). The Green Grid.

Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production, 177,* 448–463. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239

Bertolini, M., Duttilo, P., & Lisi, F. (2025). Accounting carbon emissions from electricity generation: A review and comparison of emission factor-based methods. *Applied Energy, 392*, Article 125992. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125992

Bies, D. A., Hansen, C. H., Howard, C. Q., & Hansen, K. L. (2024). *Engineering noise control: Theory and practice* (6th ed.). CRC Press/Routledge.

Borland, P. L., McDonnell, K., & Harty, M. (2023). Assessment of the potential to use the expelled heat energy from a typical data centre in Ireland for alternative farming methods. *Energies, 16*(18), Article 6704. https://doi.org/10.3390/en16186704

Capozzoli, A., & Primiceri, G. (2015). Cooling systems in data centers: State of art and emerging technologies. *Energy Procedia, 83*, 484–493. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.168

Chen, X., Bai, J., Fu, L., Lei, Y., Zhang, D., Zhang, Z., Luo, Q., Gong, S., & Shen, B. (2024). Complementary waste heat utilization from data center to ecological farm: A technical, economic and environmental perspective. *Journal of Cleaner Production, 435*, Article 140495. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140495

Città di Caselle Torinese, Città Metropolitana di Torino. (2024). *Piano particolareggiato IN-ATA – ATA SUB A. Linee di indirizzo relative all'attuazione degli interventi privati*.

Città di Caselle Torinese, Città Metropolitana di Torino. (2026). *Variante strutturale n. 3 al PRGC – Progetto definitivo. VAS1.1 – Rapporto ambientale* (SMAProgetti, Progettista).

Corigliano, O., Algieri, A., & Fragiacomo, P. (2024). Turning data center waste heat into energy: A guide to organic Rankine cycle system design and performance evaluation. *Applied Sciences*, *14* (14), Article 6046. https://doi.org/10.3390/app14146046

Cresci Marrone, G., & Culasso Gastaldi, E. (1998). *Storia di Torino. Dalla preistoria al Comune medievale* (Vol. 1, p. 139). Einaudi. https://museotorino.it/resources/pdf/books/142/files/assets/common/downloads/page0153.pdf

Davies, G. F., Maidment, G. G., & Tozer, R. M. (2016). Using data centres for combined heating and cooling: An investigation for London. *Applied Thermal Engineering, 94*, 296–304. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.111

De Vries-Gao, A. (2023). The growing energy footprint of artificial intelligence. *Joule, 7(*10), 2191–2194. https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.09.004

De Vries-Gao, A. (2026). The carbon and water footprints of data centers and what this could mean for artificial intelligence. *Patterns, 7*(1). https://doi.org/10.1016/j.patter.2025.101430

Dolbeer, R. A., Wright, S. E., & Cleary, E. C. (2000). Ranking the hazard level of wildlife species to aviation. *Wildlife Society Bulletin, 28*(2), 372–378. https://doi.org/10.2307/3783694

Dong, K., Li, P., Huang, Z., Su, L., & Sun, Q. (2017). Research on free cooling of data centers by using indirect cooling of open cooling tower. *Procedia Engineering, 205*, 2831–2838. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.902

Du, Z., Li, Q., Yang, Y., & Zhang, L. (2024, August). Research on waste heat utilization potential of data centers for agricultural greenhouse heating. *Journal of Physics: Conference Series, 2835*(1), Article 012076. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2835/1/012076/meta

Ebrahimi, K., Jones, G. F., & Fleischer, A. S. (2014). A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31*, 622–638. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.007

Ebrahimi, K., Jones, G. F., & Fleischer, A. S. (2015). Thermo-economic analysis of steady state waste heat recovery in data centers using absorption refrigeration. *Applied Energy, 139*, 384–397. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.067

ENAC – Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. (2009). *Informativa tecnica – Linee guida fonti attrattive fauna selvatica* (1a ed.). https://www.enac.gov.it/app/uploads/2024/04/IT_fonti_attrattive_fauna_selvatica.pdf

ENAC – Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. (2010). *Mappa di vincolo – Elaborato PC-01: Quadro di unione con le superfici di inviluppo* [Cartografia tecnica]. https://www.enac.gov.it/aeroporti/infrastrutture-aeroportuali/mappe-di-vincolo/

ENAC – Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. (2010). *Mappa di vincolo – Elaborato PC-01A: Aree di limitazione – Tipologia A* [Cartografia tecnica]. https://www.enac.gov.it/aeroporti/infrastrutture-aeroportuali/mappe-di-vincolo/

ENAC – Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. (2010). *Mappa di vincolo – Elaborato PC-01B: Aree di limitazione – Tipologia B* [Cartografia tecnica]. https://www.enac.gov.it/aeroporti/infrastrutture-aeroportuali/mappe-di-vincolo/

ENAC – Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. (2010). *Mappa di vincolo – Elaborato PC-01C: Aree di limitazione – Tipologia C* [Cartografia tecnica]. https://www.enac.gov.it/aeroporti/infrastrutture-aeroportuali/mappe-di-vincolo/

ENAC – Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. (2024). *Relazione annuale wildlife strike 2024* (p. 80). https://www.enac.gov.it/app/uploads/2025/07/Relazione-WS_2024.pdf#page=79.07

Energy Market Authority. (2023). *Our clean energy future. Singapore energy statistics 2023* (Chapter 3: Energy Consumption). https://www.ema.gov.sg/resources/singapore-energy-statistics/chapter3

Elsaid, K., Sayed, E. T., Yousef, B. A., Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., & Olabi, A. A. (2020). Recent progress on the utilization of waste heat for desalination: A review. *Energy Conversion and Management*, *221*, Article 113105. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113105

Frost, K., & Hua, I. (2019). Quantifying spatiotemporal impacts of the interaction of water scarcity and water use by the global semiconductor manufacturing industry. *Water Resources and Industry*, *22*, Article 100115. https://doi.org/10.1016/j.wri.2019.100115

Google. (2024). *Environmental report*. Google Sustainability. https://sustainability.google/reports/

Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefer, G., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (version 62). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 31*(7), 651–663. https://doi.org/10.1002/pip.3726

Güğül, G. N., Gökçül, F., & Eicker, U. (2023). Sustainability analysis of zero energy consumption data centers with free cooling, waste heat reuse and renewable energy systems: A feasibility study. *Energy, 262*, Article 125495. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125495

Gumisiriza, M. S., Ndakidemi, P., Nalunga, A., & Mbega, E. R. (2022). Building sustainable societies through vertical soilless farming: A cost-effectiveness analysis on a small-scale non-greenhouse hydroponic system. *Sustainable Cities and Society, 83*, Article 103923. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103923

Haywood, A., Sherbeck, J., Phelan, P., Varsamopoulos, G., & Gupta, S. K. S. (2012). Thermodynamic feasibility of harvesting data center waste heat to drive an absorption chiller. *Energy Conversion and Management, 58*, 26–34. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.12.017

Huang, P., Copertaro, B., Zhang, X., Shen, J., Löfgren, I., Rönnelid, M., Fahlen, J., Andersson, D., & Svanfeldt, M. (2020). A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating. *Applied Energy, 258*, Article 114109. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114109

International Energy Agency. (2023). *Data centers and data transmission networks*. https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks

International Energy Agency. (2024). *CO_2 emissions associated with electricity generation for data centres by case, 2020–2035* [Graph]. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-associated-with-electricity-generation-for-data-centres-by-case-2020-2035

International Energy Agency. (2024). *Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026* (p. 31). https://iea.blob.core.windows.net/assets/6b2fd954-2017-408e-bf08-952fdd62118a/Electricity2024-Analysisandforecastto2026.pdf

International Energy Agency. (2025). *Energy and AI* (pp. 242–243). https://iea.blob.core.windows.net/assets/dd7c2387-2f60-4b60-8c5f-6563b6aa1e4c/EnergyandAI.pdf

International Energy Agency. (2025). *Opportunities for district heating in the changing energy landscape*. https://www.iea.org/commentaries/opportunities-for-district-heating-in-the-changing-energy-landscape

International Organization for Standardization. (1996). *Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation* (ISO 9613-2:1996).

Istituto per le Piante da Legno e l'Ambiente (IPLA). (2018). *Manuale di campagna per il rilevamento e la descrizione dei suoli* (Parte III). Regione Piemonte. https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2018-11/parte_3.pdf

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). (2025). *Le emissioni di CO_2 nel settore elettrico nazionale e regionale* (Rapporto n. 413/2025). https://www.isprambiente.gov.it/files2025/pubblicazioni/rapporti/r413-2025_def.pdf

Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT). (2026). *Principali statistiche geografiche sui comuni*. https://www.istat.it/classificazione/principali-statistiche-geografiche-sui-comuni/

Jabeck, B. (2014). *The impact of generator set underloading*. Caterpillar.

Jiang, F., Duan, C., & Chen, B. (2025). Facility-level energy-driven water footprint and scarcity implications of Chinese data centers: A bottom-up analysis and scenario-based projection. *Applied Energy, 399*, Article 126522. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126522

Jung, S., Bae, Y., Kim, J., Joo, H., Kim, H. S., & Jung, J. (2021). Analysis of small hydropower generation potential: (1) Estimation of the potential in ungaged basins. *Energies, 14*(11), Article 2977. https://doi.org/10.3390/en14112977

Kanbur, B. B., Wu, C., Fan, S., Tong, W., & Duan, F. (2020). Two-phase liquid-immersion data center cooling system: Experimental performance and thermoeconomic analysis. *International Journal of Refrigeration*. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.05.026

Kargar, S., & Moran, J. L. (2025). Combining direct and indirect free cooling for data centers via transformation into a building-scale heat exchanger. *Applied Energy, 392*, Article 125973. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125973

Khatib, L., Pham, A., Ahmed, K., & Frenkel, V. S. (2025). Data centers and water: Challenges and solutions for sustainable cooling. *Journal AWWA*, 117*, 48–53. https://doi.org/10.1002/awwa.2504si

Kim, J. H., Shin, D. U., & Kim, H. (2024). Data center energy evaluation tool development and analysis of power usage effectiveness with different economizer types in various climate zones. *Buildings, 14*(1), Article 299. https://doi.org/10.3390/buildings14010299

Leiner, B. M., Cerf, V. G., Clark, D. D., Kahn, R. E., Kleinrock, L., Lynch, D. C., Postel, J., Roberts, L. G., & Wolff, S. (2009). A brief history of the Internet. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 39*(5), 22–31. https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2017/09/ISOC-History-of-the-Internet_1997.pdf

Li, P., Yang, J., Islam, M. A., & Ren, S. (2025). Making AI less "thirsty". *Communications of the ACM, 68*(7), 54–61. https://doi.org/10.1145/3724499

Lin, X., Zuo, L., Yin, L., Su, W., & Ou, S. (2022). An idea to efficiently recover the waste heat of data centers by constructing an integrated system with carbon dioxide heat pump, mechanical subcooling cycle and lithium bromide-water absorption refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management, 256*, Article 115398. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115398

Liu, Y., Li, W., Liu, Z., Wang, M., Wang, G., & Xu, H. (2024). *Powering the data-center boom with low-carbon solutions: China's perspective and global insights* (p. 35). RMI. https://rmi.org/insight/powering-the-data-center-boom-with-low-carbon-solutions

Ljungqvist, H. M., Mattsson, L., Risberg, M., & Vesterlund, M. (2021). Data center heated greenhouses, a matter for enhanced food self-sufficiency in sub-arctic regions. *Energy, 215*, Article 119169. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119169

Luo, Y., Andresen, J., Clarke, H., Rajendra, M., & Maroto-Valer, M. (2019). A decision support system for waste heat recovery and energy efficiency improvement in data centres. *Applied Energy, 250*, 1217–1224. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.029

Madrigal-González, J., Calatayud, J., Ballesteros-Canovas, J. A., et al. (2023). Global patterns of tree density are contingent upon local determinants in the world's natural forests. *Communications Biology, 6*, Article 11. https://doi.org/10.1038/s42003-023-04419-8

Makrak-Singh, M. (2025). *How thirsty is AI really*. SSRN. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5926862

Marzadori, C., & Ciavatta, C. (2011). *La determinazione del pH* [Presentazione]. Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroambientali (DiSTA), Università di Bologna; Associazione Italiana dei Laboratori Pubblici Agrochimici. https://scienzadelsuolo.org/docs/commissioni/02_Marzadori_pH.pdf

Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science, 367* (6481), 984–986. https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba3758

Masoni, A., & Ercoli, L. (2010). *Azoto nel terreno in riduzione dell'inquinamento delle acque dai nitrati provenienti dall'agricoltura* (p. 213). Felici Editore. https://www.iris.sssup.it/retrieve/handle/11382/306758/1104/7-Azoto

Masters, G. M. (2004). *Renewable and efficient electric power systems*. Wiley Interscience.

Mihailova, D., Schubert, I., Burger, P., & Fritz, M. M. (2022). Exploring modes of sustainable value co-creation in renewable energy communities. *Journal of Cleaner Production, 330*, Article 129917. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129917

Morley, J., Widdicks, K., & Hazas, M. (2018). Digitalisation, energy and data demand: The impact of Internet traffic on overall and peak electricity consumption. *Energy Research & Social Science, 38*, 128–137. https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.01.018

Mytton, D., & Ashtine, M. (2022). Sources of data center energy estimates: A comprehensive review. *Joule, 6*(9), 2032–2056. https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.07.011

OpenStreetMap Foundation. (2024). *OpenStreetMap* [Dataset geospaziale]. https://www.openstreetmap.org/#map=6/42.09/12.56

Oró, E., Taddeo, P., & Salom, J. (2019). Waste heat recovery from urban air cooled data centres to increase energy efficiency of district heating networks. *Sustainable Cities and Society*, *45*, 522–542. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.012

Pan, Q., Peng, J., & Wang, R. (2021). Application analysis of adsorption refrigeration system for solar and data center waste heat utilization. *Energy Conversion and Management*, *228*, Article 113564. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113564

Patterson, D., Gonzalez, J., Holzle, U., Le, Q., Liang, C., Munguia, L.-M., Rothchild, D., So, D. R., Texier, M., & Dean, J. (2022). The carbon footprint of machine learning training will plateau, then shrink. *Computer*, *55*(7), 18–28. https://doi.org/10.1109/MC.2022.3148714

Patterson, M., Azevedo, D., Belady, S. C., & Pouchet, J. (2011). *Water usage effectiveness (WUE): A green grid datacenter sustainability metric* (Vol. 32, p. 16). The Green Grid.

Provero, L. (1998). Caselle Torinese. In *Schedario storico-territoriale dei comuni piemontesi*. Centro Interuniversitario di Storia Territoriale "Goffredo Casalis" – Regione Piemonte. https://www.archiviocasalis.it/localized-install/content/caselle-torinese

Regione Campania - Settore Sperimentazione, Informazione, Ricerca e Consulenza in Agricoltura. (s.d.). *La sostanza organica del suolo: proprietà e funzioni* (Foglio divulgativo di pedologia, Parte 1). https://agricoltura.regione.campania.it/pedologia/pdf/sostanza_organica_del_suolo_parte1.pdf

Regione Piemonte - Direzione Agricoltura e Cibo. (2026). *Uso del suolo agricolo su mosaicatura catastale di riferimento regionale 2025* [Dataset vettoriale]. Geoportale Piemonte. https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/metadata/r_piemon:d1252f4d-8c29-4995-b85b-4bbfb179cc70

Regione Piemonte - Istituto per le Piante da Legno e l'Ambiente (IPLA). (2023). *Carta dei suoli 1:50.000* [Dataset vettoriale]. Geoportale Piemonte. https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/metadata/r_piemon:37c6413b-b07f-4f4c-9344-f2e43ea52bbd

Regione Piemonte - Laboratorio Agronomico Regionale (LAR). (2024). *Atlante delle analisi dei terreni* [Dataset vettoriale]. Geoportale Piemonte. https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/metadata/r_piemon:c91e059a-84db-462c-a00a-db39ae6b08af

Regione Piemonte – Settore Biodiversità e Aree Naturali. (2015). *Carta degli habitat (in lavorazione) dei siti Rete Natura 2000* [Dataset vettoriale]. https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/metadata/r_piemon:c33f4628-d6e4-4f3c-a5dd-ee4d30445ca6

Regione Piemonte – Settore Sistema Informativo Territoriale e Ambientale. (2025). *BDTRE 2025: Database geotopografico del Piemonte* [Dataset vettoriale]. https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/metadata/r_piemon:da9b12ba-866a-4f0f-8704-5b7b753e4f15

Regione Piemonte - Settore Sistema Informativo Territoriale e Ambientale. (2024). *Land Cover Piemonte: Classificazione di uso e copertura del suolo* [Dataset vettoriale]. https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/metadata/r_piemon:35df8a16-5d89-461f-a0f2-abc2180713d2

Reig, P., Luo, T., Christensen, E., & Sinistore, J. (2020). *Guidance for calculating water use embedded in purchased electricity* (p. 2). World Resources Institute.

Ristic, B., Madani, K., & Makuch, Z. (2015). The water footprint of data centers. *Sustainability*, *7*(8), 11260–11284. https://doi.org/10.3390/su70811260

Rogoway, M. (2022, December). Google's water use is soaring in The Dalles, records show, with two more data centers to come. *The Oregonian/OregonLive*. https://www.oregonlive.com/silicon-forest/2022/12/googles-water-use-is-soaring-in-the-dalles-records-show-with-two-more-data-centers-to-come.html

Rosato, A., Perrotta, A., & Maffei, L. (2024). Commercial small-scale horizontal and vertical wind turbines: A comprehensive review of geometry, materials, costs and performance. *Energies, 17*(13), Article 3125. https://doi.org/10.3390/en17133125

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2014). *Physics for scientists and engineers* (pp. 232–234). Cengage Learning.

Shehabi, A., Newkirk, A., Smith, S. J., Hubbard, A., Lei, N., Siddik, M. A. B., Holecek, B., Koomey, J., Masanet, E., & Sartor, D. (2024). *2024 United States data center energy usage report* (pp. 40–41, 52–56). Lawrence Berkeley National Laboratory. https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/2024-12/lbnl-2024-united-states-data-center-energy-usage-report_1.pdf

Shuja, J., Bilal, K., Madani, S. A., Othman, M., Ranjan, R., Balaji, P., & Khan, S. U. (2016). Survey of techniques and architectures for designing energy-efficient data centers. *IEEE Systems Journal, 10*(2), 507–519. https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2319723

Sijmons, D. F. (2014). *Landscape and energy: Designing transition* (pp. 10–21). nai010 publishers.

Società Italiana della Scienza del Suolo. (s.d.). *Capitolo XV - Fosforo: Metodi di determinazione del fosforo nel suolo* (p. 2). https://scienzadelsuolo.org/docs/commissioni/111019_Capitolo_XV_fosforo.pdf

Tarquini, S., Isola, I., Favalli, M., & Battistini, A. (2007). *TINITALY, a digital elevation model of Italy with a 10 m-cell size* (Version 1.0) [Dataset]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://tinitaly.pi.ingv.it/Download_Area1_0.html

Terenius, P., Garraghan, P., & Harper, R. (2023). A material social view on data center waste heat: Novel uses and metrics. *Frontiers in Sustainability, 3*, Article 1008583. https://doi.org/10.3389/frsus.2022.1008583

Tifrit, A., Benabdallah, T., & Benchenane, H. (2025). Transactional engineering for green airports maximizing taxiing energy recovering case. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*. https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i2.5887

UK Civil Aviation Authority. (2017). *Wildlife hazard management at aerodromes* (p. 19). https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/207.pdf

Uptime Institute. (2023). *Tier standard: Topology*.

Wagner, B. (2018). *Intergenerational energy efficiency of Dell EMC PowerEdge servers*. Dell EMC/PG Enterprise Solutions Performance Analysis Team.

Wang, L., & Iddio, E. (2022). Energy performance evaluation and modeling for an indoor farming facility. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 52*, Article 102240. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102240

Wang, R., Wang, T., Li, Z., Luo, H., Liu, H., Wang, Z., Liu, H., Jiang, Y., & Xu, L. (2025). Waste heat utilization of data centers based on heat pump technology from the perspectives of supply and demand: An overview. *Sustainable Cities and Society, 130*, Article 106543. https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106543

Yañez-Barnuevo, M. (2026). *Communities are raising noise pollution concerns about data centers*. Environmental and Energy Study Institute (EESI). https://www.eesi.org/articles/view/communities-are-raising-noise-pollution-concernsabout-data-centers

Yang, J., Zhang, Z., Yang, L., Hong, M., Bie, Y., Xu, T., & Chen, J. (2023). Coupling effect between waste heat recovery and government subsidy with supply chain as a pivot. *Sustainable Cities and Society, 99*, Article 104897. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104897

Yuan, X., Liang, Y., Hu, X., Xu, Y., Chen, Y., & Kosonen, R. (2023). Waste heat recoveries in data centers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 188*, Article 113777. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113777

Yuan, X., Liu, J., Sun, S., Lin, X., Fan, X., Zhao, W., & Kosonen, R. (2025). Data center waste heat for district heating networks: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 219*, Article 115863. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115863

Zhang, C., Luo, H., & Wang, Z. (2022). An economic analysis of waste heat recovery and utilization in data centers considering environmental benefits. *Sustainable Production and Consumption, 31*, 127-138. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.02.006

Zhang, H., Shao, S., Xu, H., Zou, H., & Tian, C. (2014). Free cooling of data centers: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 35*, 171-182. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.017

Zhang, P., Wang, B., Wu, W., Shi, W., & Li, X. (2015). Heat recovery from Internet data centers for space heating based on an integrated air conditioner with thermosyphon. *Renewable Energy, 80*, 396-406. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.032

Zhang, Y., Wei, Z., & Zhang, M. (2017). Free cooling technologies for data centers: Energy saving mechanism and applications. *Energy Procedia, 143*, 410-415. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.703

Ziaei, P., Husev, O., & Rabkowski, J. (2025). Data centers as a driving force for the renewable energy sector. *Energies, 19*(1), Article 236. https://doi.org/10.3390/en19010236

Zittrain, J. (2008). *The future of the Internet-and how to stop it* (p. 29). Yale University Press.

sitografia

Arndt, S.-E. (2016). *Alauda arvensis - Eurasian skylark singing from fence pole along field* [Fotografia digitale]. Getty Images. https://www.gettyimages.co.uk (ultima consultazione: maggio 2026)

ARPA Piemonte. (2014). *Sistema di monitoraggio del rumore dell'aeroporto di Torino-Caselle* [Dataset WMS]. Geoportale Piemonte. https://webgis.arpa.piemonte.it/server/services/rumore_vibrazioni/Sistema_monitoraggio_aeroporto_caselle/MapServer/WMSServer?request=GetCapabilities&service=WMS (ultima consultazione: agosto 2026)

Assaeroporti - Associazione Italiana Gestori Aeroporti. (2026). *Dati di traffico*. https://assaeroporti.com/dati-di-traffico/ (ultima consultazione: agosto 2026)

Brunner, W. (2016). *Apus apus - Rondone* [Fotografia digitale]. Irish Wildlife Trust. https://www.instagram.com/p/DYeS4QIgkI6/ (ultima consultazione: maggio 2026)

CERN. (s.d.). *World Wide Web project*. https://worldwideweb.cern.ch/ (ultima consultazione: luglio 2026)

Città Metropolitana di Torino. (2026). *Mosaico dei PRGC della Città Metropolitana di Torino* [Dataset]. Geoportale Città Metropolitana di Torino. https://www.geoportale.cittametropolitana.torino.it/geonetwork/cmto/api/records/cmto:3bd46895-3158-4354-916d-545b7739c8db

Colombatto, G. (2019). *Le incursioni aeree durante la Seconda Guerra Mondiale*. Cose Nostre. https://www.cosenostre-online.it/2019/03/le-incursioni-aeree-durante-la-seconda-guerra-mondiale/ (ultima consultazione: giugno 2026)

Colombatto, G. (2022). *La storia della nostra amata vecchia stazione*. Cose Nostre. https://osservatoriotorinoceres.wordpress.com/storia-della-stazione-di-caselle/ (ultima consultazione: giugno 2026)

ENAC & SAGAT S.p.A. (2026). *ENAC dà il via libera al Master Plan per lo sviluppo infrastrutturale dell'aeroporto di Torino* [Comunicato stampa]. https://www.aeroportoditorino.it/cs-04_24_2026-enac-sagat-master-plan-aeroporto-torino_ita.pdf

European Commission, Joint Research Centre. (2025). *PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System*. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/it/ (ultima consultazione: luglio 2026)

Geuze, A., & Buijs, M. (2014). West 8 airport landscape: Schiphol. *Scenario Journal*. https://scenariojournal.com/article/airport-landscape/ (ultima consultazione: maggio 2026)

Hempel, J. (2007). *Gabbiano reale - Larus michahellis* [Fotografia digitale] [Licenza CC BY-SA 2.0]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=larus+michahellis&title=Special%3AMediaSearch&type=image (ultima consultazione: maggio 2026)

Iowa State University, Department of Agronomy. (2026). *Iowa Environmental Mesonet*. (ultima consultazione: febbraio 2026)

LIPU ODV. (2024). *Allodola*. https://www.lipu.it/uccelli/conoscerli-proteggerli/allodola (ultima consultazione: maggio 2026)

LIPU ODV. (2024). *Barbagianni*. https://www.lipu.it/uccelli/conoscerli-proteggerli/barbagianni (ultima consultazione: maggio 2026)

LIPU ODV. (2024). *Colombaccio*. https://www.lipu.it/uccelli/conoscerli-proteggerli/colombaccio (ultima consultazione: maggio 2026)

LIPU ODV. (2024). *Gabbiano reale*. https://www.lipu.it/uccelli/conoscerli-proteggerli/gabbiano-reale (ultima consultazione: maggio 2026)

LIPU ODV. (2024). *Gheppio*. https://www.lipu.it/uccelli/conoscerli-proteggerli/gheppio (ultima consultazione: maggio 2026)

LIPU ODV. (2024). *Piccione*. https://www.lipu.it/uccelli/conoscerli-proteggerli/piccione-selvatico (ultima consultazione: maggio 2026)

LIPU ODV. (2024). *Poiana*. https://www.lipu.it/uccelli/conoscerli-proteggerli/poiana (ultima consultazione: maggio 2026)

LIPU ODV. (2024). *Rondine*. https://www.lipu.it/uccelli/conoscerli-proteggerli/rondine (ultima consultazione: maggio 2026)

LIPU ODV. (2024). *Rondone*. https://www.lipu.it/uccelli/conoscerli-proteggerli/rondone-comune (ultima consultazione: maggio 2026)

LIPU ODV. (2024). *Taccola*. https://www.lipu.it/uccelli/conoscerli-proteggerli/taccola (ultima consultazione: maggio 2026)

Mukherjee, T. (2026). *Gheppio - Falco tinnunculus* [Fotografia digitale] [Licenza CC BY-SA 4.0]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Falco_tinnunculus#/media/File:Eurasian_Kestrel_in_Tal_Chhapar_Sanctuary_November_2025_by_Tisha_Mukherjee_01.jpg (ultima consultazione: maggio 2026)

Museo Torino. (2024). *Inaugurazione dell'aeroporto di Torino Caselle (30 luglio 1953)*. Fondazione Torino Musei. https://www.museotorino.it/view/s/d23ee54b75be4fe08179c9c16275339f (ultima consultazione: giugno 2026)

Plumber, K. (s.d.). *Piccione - Columba livia* [Fotografia digitale] [Licenza CC BY-NC-ND]. Flickr. https://www.flickr.com/photos/plumberjohn/5439602109/ (ultima consultazione: maggio 2026)

Rantala, M. (2011). *Taccola - Coloeus monedula* [Fotografia digitale] [Licenza CC BY-SA 3.0]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=coloeus+monedula&title=Special%3AMediaSearch&type=image (ultima consultazione: maggio 2026)

Rigodanza, G. (2024). *Storia di Caselle Torinese*. Comune di Caselle Torinese. https://www.comune.caselle-torinese.to.it/it/vivere/752747 (ultima consultazione: 2026)

Romzig. (2025). *Colombaccio - Columba palumbus* [Fotografia digitale]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=columba+palumbus&title=Special%3AMediaSearch&type=image (ultima consultazione: maggio 2026)

SAGAT. (s.d.). *Cenni storici sull'Aeroporto di Torino*. Aeroporto di Torino. https://www.aeroportoditorino.it/it/sagat/area-stampa/news-e-comunicati/cenni-storici (ultima consultazione: giugno 2026)

Sharp, C. J. (2014). *Rondine - Hirundo rustica* [Fotografia digitale] [Licenza CC BY-SA 4.0]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=hirundo+rustica&title=Special%3AMediaSearch&type=image (ultima consultazione: maggio 2026)

Space Exploration Technologies Corp. (2026). **Form S-1 registration statement**. U.S. Securities and Exchange Commission. https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1181412/000162828026036936/spaceexplorationtechnologi.htm (ultima consultazione: luglio 2026)

Tonoli, G. (s.d.). *Poiana comune (Buteo buteo)* [Fotografia digitale]. Instagram. https://www.instagram.com/giacomotonoli/ (ultima consultazione: maggio 2026)

Udinmwen, E. (2025, November 2). Forget Project Natick - China says it has trumped Microsoft and launched its first underwater data center. *TechRadar Pro*. https://www.techradar.com/pro/forget-project-natick-china-says-it-has-trumped-microsoft-and-launched-its-first-underwater-data-center (ultima consultazione: luglio 2026)

Williams, A. (2016). *Barbagianni (Tyto alba)* [Fotografia digitale] [Licenza CC BY-SA 4.0]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=tyto+alba&title=Special%3AMediaSearch&type=image (ultima consultazione: maggio 2026)

Desidero ringraziare con particolare affetto il mio relatore, Prof. Gianni Lobosco, il cui insegnamento è stato per me davvero prezioso: la sua guida attenta, la pazienza e i suggerimenti puntuali mi hanno accompagnato in ogni fase di questo lavoro, aiutandomi a dare forma e rigore a un'idea complessa, e a crescere anche al di là della tesi stessa. Sono profondamente grata per il tempo, la fiducia e la dedizione che ha voluto riservarmi.

Ringrazio i professori Carlo Rosso e Fabio Bruzzone per il confronto generoso e competente sull'impatto ambientale, sui consumi energetici e sulle strategie di recupero affrontate in questa tesi: il loro contributo è stato determinante per rendere solide le basi tecniche di questo lavoro.

Ringrazio infine il Prof. Daniel Edward Chamberlain, che ha condiviso con me il suo tempo e le sue conoscenze, offrendomi una lettura essenziale per comprendere le dinamiche dell'avifauna e il rapporto tra paesaggio agricolo e rischio aeroportuale.