Fessurazioni Visibili

Documento di specifiche tecniche di elaborazione

Autore: Gennaro Setola

Versione del documento: v1.0

Data:31/08/2026

Sommario

1. Obiettivi del Data Product 4

1.1 Problema ed esigenza di riferimento 4

1.2 Contesto organizzativo, applicativo e di dominio 4

1.3 Categorie di utenti e sistemi destinatari 5

1.4 Risultati attesi 5

1.5 Principali casi d'uso supportati 5

1.6 Processi, decisioni e attività migliorati 6

2. Origine dei dati ed eventuali elaborazioni 6

2.1 Fonti dei dati di origine 6

2.2 Elaborazioni effettuate all'origine (Pre-ingresso nel DP Lab) 9

2.3 Elaborazioni e trasformazioni realizzate all'interno del DP Lab 9

3. Tecnologie utilizzate all'interno del Data Product Lab 11

3.1. Servizi abilitanti DPaaS 11

1. Object Storage S3 (Storage non strutturato e binari) 11

2. Database Relazionale per Dati Strutturati (PostgreSQL) 11

3. Ambiente di Esecuzione DP Lab (Contenitore Computazionale) 12

4. Web Service Data Product (WSDP - FastAPI REST Engine) 12

3.2. Eventuali tecnologie esterne a DPaaS 13

Dipendenze e vincoli operativi 14

4. Pipeline di elaborazione e trasformazione 15

4.1 Schema logico del flusso di elaborazione 15

4.2 Fasi dettagliate della pipeline 15

Fase 1: Ingestione e Validazione Formale d'Ingresso 16

Fase 2: Normalizzazione Radiometrica e Co-registrazione Spaziale 16

Fase 3: Rasterizzazione e Calcolo dei Descrittori Morfometrici 17

Fase 4: Strutturazione Relazionale e Archiviazione Binari 18

Fase 5: Esposizione e Pubblicazione nel Catalogo WSDP 19

4.3 Modalità e frequenza di esecuzione 20
5. Esposizione e distribuzione 21
5.1 Canali di accesso e requisiti generali di fruizione 21
5.2 Modalità di fruizione tramite Dataset 22
5.2.1 Organizzazione logica e formato dei file 22
5.2.2 Struttura delle entità e schema relazionale 22
5.2.3 Dizionario dati dei principali campi 23
5.3 Modalità di fruizione tramite Web Service API (WSDP) 25
5.3.1 Funzionalità e operazioni messe a disposizione 25
5.3.2 Modello ad alto livello delle risorse 26
5.3.3 Gestione degli errori e politiche di limitazione 27
5.4 Nota sulle condizioni di condivisione, licenza e riutilizzo dei dati 27
5.6. Limitazioni 29
Copertura geografica e temporale 29
Vincoli geometrici, ottici e radiometrici 29
Accuratezza metrica, approssimazioni e soglie di rilevabilità 30
Prestazioni computazionali, fruizione e limiti di accesso 30
Casi d'uso non supportati e vincoli d'uso 31
6. Possibili evoluzioni future 32
6.1 Quadro sinottico delle evoluzioni pianificate 32
6.2 Descrizione dettagliata delle singole evoluzioni 32
EVO-01: Integrazione con reti di sensori termo-igrometrici e dati meteo ambientali 33
EVO-02: Estensione della copertura geografica ad altri ambienti archeologici 33
EVO-03: Automazione dell'acquisizione con postazioni diagnostiche semi-permanenti 34

1. Obiettivi del Data Product

1.1 Problema ed esigenza di riferimento

La conservazione programmata e la diagnostica strutturale delle superfici murarie storiche e degli apparati decorativi affrescati — con particolare riferimento alle evidenze archeologiche del Parco Archeologico di Pompei (es. Parete Nord delle Terme Femminili) — richiedono una mappatura accurata, oggettiva e ripetibile delle discontinuità materiche e dei quadri fessurativi.

Tradizionalmente, la documentazione del degrado fessurativo si scontra con limiti legati alla frammentarietà dei rilievi, alla soggettività del tracciamento manuale e alla dispersione di dati acquisiti con strumentazioni radiometriche e termografiche eterogenee.

Il Data Product **"Fessurazioni visibili annotate"** nasce per rispondere all'esigenza di strutturare, normalizzare e mettere a disposizione un patrimonio informativo omogeneo e geometricamente rigoroso composto da:

- Matrici termografiche ad alta risoluzione convertite in formati aperti e standardizzati;
- Maschere binarie di segmentazione (Ground Truth) e annotazioni vettoriali poligonali dei pattern fessurativi;
- Metadati geometrico-dimensionali (lunghezza, ampiezza, area in pixel e millimetri, bounding box) e parametri termo-igrometrici ambientali al contorno.

1.2 Contesto organizzativo, applicativo e di dominio

Il Data Product si colloca all'interno della categoria tematica **"Diagnostica, Restauro & Monitoraggio"** dell'Ecosistema Digitale per la Cultura (**Ecomic / Piattaforma DPaaS**), sviluppato nell'ambito delle iniziative del PNRR (Missione 1, Componente 3, Investimento 1.1 *"Strategie e piattaforme digitali per il patrimonio culturale"* - Lotto 4).

L'iniziativa vede la collaborazione scientifica e istituzionale tra il **Politecnico di Bari** (Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design - DICAR) come ente proprietario

del dataset, **Superelectric S.r.l.** come soggetto realizzatore, e gli organismi di tutela e gestione del patrimonio archeologico.

1.3 Categorie di utenti e sistemi destinatari

Il Data Product è progettato per servire molteplici profili operativi e piattaforme applicative:

- **Funzionari di tutela, archeologi e restauratori:** per la consultazione dello storico conservativo e la verifica dello stato di integrità delle superfici pittoriche e murarie;
- **Ingegneri civili strutturisti ed esperti di diagnostica:** per l'analisi quantitativa e dimensionale dei cinematica fessurativi su base metrica;
- **Piattaforme e sistemi terzi di Livello 3 (GIS, BIM, Cruscotti di monitoraggio integrato):** per l'interoperabilità e il consumo automatico dei flussi dati, delle geometrie e dei metadati dimensionali tramite API RESTful;
- **Istituti di ricerca e laboratori universitari:** per studi comparativi sui materiali e sulle patologie di degrado tipiche delle strutture di epoca romana.

1.4 Risultati attesi

L'adozione del Data Product garantisce i seguenti risultati:

- **Standardizzazione del dato diagnostico:** trasformazione delle matrici radiometriche grezze acquisite sul campo in dataset conformi a standard aperti (.tif standardizzato a 1280x1024 pixel, maschere 1-bit, formati vettoriali e JSON strutturati);
- **Tracciabilità geometrica certificata:** fornitura di rilievi fessurativi validati e corredati da metriche oggettive e univoche;
- **Interoperabilità machine-to-machine:** esposizione strutturata delle entità (*Image*, *Annotation*, *ImageDetail*, *ImageSummary*) pronte per l'integrazione diretta in banche dati di conservazione preventiva.

1.5 Principali casi d'uso supportati

1. **Accesso ed esportazione del dataset certificato:** estrazione massiva o puntuale dei pacchetti dati contenenti immagini visibili/visibili accoppiate ai rispettivi file di annotazione geometrica (maschere e poligoni) per documentazione e analisi storica;

2. **Integrazione in piattaforme di monitoraggio e cruscotti territoriali:** ingestione programmatica delle coordinate spaziali delle fessure, delle bounding box e dei report dimensionali all'interno di modelli digitali 3D, ambienti GIS o piattaforme HBIM;
3. **Analisi metrica comparativa multi-temporale:** correlazione di rilievi fessurativi eseguiti in epoche successive per quantificare variazioni di area, allungamenti, stabilità o regressione delle discontinuità superficiali.

1.6 Processi, decisioni e attività migliorati

L'impiego sistematico del Data Product permette di ottimizzare:

- **La pianificazione degli interventi di restauro e consolidamento:** indirizzando le risorse prioritariamente verso le zone che evidenziano criticità dimensionali accertate;
- **I protocolli di monitoraggio non distruttivo (NDT):** eliminando la necessità di saggi invasivi o presidi a contatto prolungato sulle superfici di pregio;
- **La continuità documentale del bene culturale:** garantendo un archivio digitale permanente e interoperabile dello stato di conservazione delle murature archeologiche nel tempo.

2. Origine dei dati ed eventuali elaborazioni

2.1 Fonti dei dati di origine

Il Data Product **"Fessurazioni visibili annotate"** raccoglie, integra e struttura dati radiometrici, geometrici e descrittivi derivanti dalle campagne di indagine diagnostica non distruttiva (NDT) condotte presso il Parco Archeologico di Pompei, con specifico riferimento agli ambienti delle Terme Femminili (es. Parete Nord e apparati murari con pareti radianti e intonaci storici).

Di seguito sono descritte le caratteristiche delle fonti informative primarie:

Fonti primarie

Proprietà	Dati Termografici Radiometrici	Rilievi Ottici e Multispettrali	Annotazioni Geometriche e Maschere (Ground Truth)
Sistema / Archivio di origine	Sistema di acquisizione termografica stazionario su cavalletto / postazione fissa	Dispositivi di ripresa fotografica ad alta risoluzione coassiali	Archivio di rilievo geometrico e vettorializzazione manuale DICAR
Soggetto titolare della fonte	Politecnico di Bari (DICAR) in accordo con il Parco Archeologico di Pompei	Politecnico di Bari (DICAR) in accordo con il Parco Archeologico di Pompei	Politecnico di Bari (DICAR)
Tipologia e formato dei dati	Matrici radiometriche di temperatura superficiale, formato nativo convertito in raster `.tif` standard	Immagini nel visibile a 3 canali colore RGB ad alta risoluzione, formato `.tif` / `.png`	Maschere binarie raster 1-bit (`.tif`), coordinate poligonali e bounding box vettoriali (`.json`)
Modalità di acquisizione	Campagne periodiche di scansione termografica stazionaria e	Ripresa ottica in corrispondenza delle medesime inquadrature visibili	Tracciamento e rilievo geometrico operato da specialisti di diagnostica strutturale

	monitoraggio a intervalli temporali definiti	(registrazione spaziale)	
Frequenza di aggiornamento	Discreta (acquisizioni batch in base al calendario delle campagne diagnostiche)	Discreta (in sincronia con i rilievi termografici)	Aggiornamento contestuale alla validazione dei nuovi rilievi di campo
Volume indicativo dei dati	Singole matrici da 1280 x 1024 pixel (1.3 MP per fotogramma, circa 2.5 - 5 MB per file TIFF non compresso)	Immagini RGB ad alta definizione (circa 5 - 10 MB per fotogramma)	Maschere binarie 1-bit (circa160 KB per file) e file JSON descrittivi (circa5 - 50 KB)
Vincoli di licenza e accesso	Licenza aperta standard per i beni culturali (es. CC BY 4.0 / BCS); vincoli di tutela archeologica	Licenza aperta standard (CC BY 4.0 / BCS)	Licenza aperta standard (CC BY 4.0 / BCS)
Qualità e completezza	Elevata uniformità termica; calibrazione radiometrica con correzione dei coefficienti di emissività \varepsilon	Elevata nitidezza ottica, uniformità di illuminazione controllata	Geometrie continue e certificate, chiusura poligonale e coerenza topologica verificate

2.2 Elaborazioni effettuate all'origine (Pre-ingresso nel DP Lab)

Prima dell'acquisizione all'interno dell'ambiente del Data Product Lab (DP Lab), i dati grezzi raccolti sul campo vengono sottoposti a trattamenti preliminari specialistici di calibrazione e normalizzazione:

1. **Calibrazione radiometrica e compensazione termica:**
   - Applicazione delle curve di correzione dell'emissività (circa 0.90 - 0.94 per malte, laterizi e intonaci romani);
   - Compensazione della temperatura riflessa di fondo e dei fattori di attenuazione atmosferica in base ai parametri termo-igrometrici ambientali misurati al momento del rilievo (temperatura e umidità relativa dell'aria).
2. **Conversione e decodifica dei formati proprietari:**
   - Estrazione dei valori di temperatura assoluta dalle matrici proprietarie delle termocamere di campo;
   - Esportazione in matrici numeriche aperte a 16-bit e standardizzazione del formato immagine in TIFF non compresso a 3 canali o canale singolo radiometrico.
3. **Registrazione geometrica e correzione prospettica:**
   - Rettifica prospettica e omografica delle inquadrature per allineare le matrici termografiche alla superficie piana di rilievo;
   - Co-registrazione spaziale tra le immagini nel canale visibile e le matrici visibili per garantire la perfetta sovrapponibilità pixel-to-pixel.
4. **Tracciamento manuale e validazione delle discontinuità (Ground Truth):**
   - Generazione delle maschere binarie a singolo bit (valore `1` per i pixel appartenenti alla lesione/fessura, `0` per il supporto murario sano);

2.3 Elaborazioni e trasformazioni realizzate all'interno del DP Lab

Una volta caricati i dati grezzi e semi-lavorati all'interno dell'infrastruttura DP Lab (archiviazione Object Storage S3 e database relazionale), vengono eseguite le procedure automatizzate per la conformità agli standard del Data Product:

1. **Controllo di conformità dimensionale e risoluzione rigida:**
    - Verifica automatica delle dimensioni della matrice raster: ammissione e validazione esclusiva delle immagini a risoluzione fissa di 1280 x 1024 pixel;
    - Rigetto o riscalamento controllato per file non conformi ai requisiti geometrici di base.
2. **Estrazione e calcolo dei descrittori geometrici:**
    - Analisi morfologica delle maschere binarie per il calcolo automatico dei seguenti parametri dimensionali:
        - **Area totale della discontinuità:** conteggio del numero complessivo di pixel attivi e conversione in mm^2;
        - **Bounding Box:** determinazione delle coordinate minime e massime del rettangolo contenitore (x, y, w, h) per ogni singola entità fessurativa;
        - **Lunghezza e ampiezza media stimata:** calcolo dello scheletro morfologico (medial axis) e della proiezione geometrica lungo l'asse principale della lesione.
3. **Strutturazione dei metadati e indicizzazione relazionale:**
    - Parsing dei file JSON di rilievo e associazione biunivoca con l'identificativo immagine (`ImageId`);
    - Popolamento delle tabelle relazionali:
        - `Image`: tracciamento dell'immagine grezza, nome del file tiff archiviato su S3, timestamp di rilievo e caratteristiche fisiche;
        - `Annotation`: archiviazione della maschera binaria 1-bit, del file vettoriale e delle proprietà dimensionali aggregate;
        - `ImageSummary`: aggregazione sintetica del numero di fessure
        - `ImageDetail`: elenco puntuale delle fessure identificate, coordinate spaziali e riferimenti diretti ai raster.
4. **Validazione di integrità e pubblicazione:**
    - Controllo di consistenza relazionale tra URI delle risorse grafiche su storage S3 e record di database PostgreSQL;
    - Esposizione controllata delle entità per il catalogo e per i servizi di distribuzione.

3. Tecnologie utilizzate all'interno del Data Product Lab

La presente sezione descrive l'ecosistema tecnologico, l'infrastruttura computazionale e i componenti software impiegati all'interno del Data Product Lab (DP Lab) per la gestione, trasformazione, strutturazione e pubblicazione del Data Product **"Fessurazioni visibili annotate"**.

L'architettura è concepita per garantire elevati standard di integrità del dato radiometrico, precisione nel calcolo metrico delle discontinuità geometriche ed efficienza nell'erogazione delle risorse informative verso i sistemi consumatori.

3.1. Servizi abilitanti DPaaS

All'interno dell'infrastruttura DPaaS (Data Product as a Service) dell'Ecosistema Digitale per la Cultura (**Ecomic**), vengono impiegati i seguenti moduli e servizi abilitanti:

1. Object Storage S3 (Storage non strutturato e binari)

- **Denominazione:** DPaaS Object Storage Service (compatibile Amazon S3 / Ceph).
- **Funzione svolta nel processo:** Archiviazione scalabile, distribuita e ad alta disponibilità degli asset pesanti: matrici radiometriche grezze normalizzate (`.tif` a 1280 x 1024), immagini ottiche ad alta risoluzione, maschere binarie di segmentazione pixel-wise (Ground Truth a 1-bit) e mappe grafiche evolutive.
- **Fase della pipeline:** Ingestione iniziale dei dati di campo, archiviazione persistente dei file grafici derivati e fruizione tramite download diretto o URL firmati (presigned URL).
- **Modalità di integrazione:** Connessione via protocollo S3 API con credenziali sicure basate su policy IAM a privilegio minimo.
- **Input / Output:**
  - *Input:* Pacchetti raster caricati dalle campagne diagnostiche di campo;
  - *Output:* URI univoci delle risorse binarie memorizzati all'interno delle tabelle del database relazionale.

2. Database Relazionale per Dati Strutturati (PostgreSQL)

- **Denominazione:** DPaaS Relational Database Service (PostgreSQL con estensioni per la manipolazione di geometrie e metadati).
- **Funzione svolta nel processo:** Gestione della persistenza dei metadati descrittivi, dimensionali e relazionali del dataset, garantendo l'indicizzazione dei record e la consistenza transazionale (ACID) tra gli identificativi di rilievo (`ImageId`), le proprietà geometriche delle lesioni e le relative annotazioni.
- **Fase della pipeline:** Fase di indicizzazione, calcolo aggregato e supporto al backend di esposizione dei dati.
- **Modalità di integrazione:** Accesso mediante connection pool standard su rete interna sicura (TLS).
- **Input / Output:**
  - *Input:* Parametri dimensionali estratti dalle maschere e dai file JSON descrittivi;
  - *Output:* Dataset strutturato suddiviso nelle tabelle logiche `Image`, `Annotation`, `ImageSummary` e `ImageDetail`.
- **Configurazioni adottate:** Indici B-Tree su identificativi e attributi dimensionali per ottimizzare l'esecuzione delle query e i filtri di consultazione (es. filtraggio per soglie minime di area/lunghezza).

3. Ambiente di Esecuzione DP Lab (Contenitore Computazionale)

- **Denominazione:** DPaaS Compute Lab Container (ambiente Linux containerizzato basato su Docker / OCI).
- **Funzione svolta nel processo:** Hosting ed esecuzione automatizzata degli script di validazione formale, controllo di risoluzione, estrazione delle proprietà morfologiche dalle maschere binarie e formattazione dei dati JSON.
- **Fase della pipeline:** Pipeline di elaborazione, normalizzazione e controllo qualità (QA/QC) pre-pubblicazione.
- **Modalità di integrazione:** Pipeline batch orchestrata in ambiente isolato con montaggio temporaneo dei volumi di lavoro e accesso diretto agli endpoint S3 e PostgreSQL.
- **Input / Output:**
  - *Input:* File raster TIFF e descrittori grezzi non validati;
  - *Output:* Maschere 1-bit verificate, tabelle relazionali popolate e report dimensionali strutturati.
- **Configurazioni adottate:** Allocazione dinamica di memoria e CPU calibrata per la gestione simultanea di matrici raster da 1.3 MP (1280 x 1024).

4. Web Service Data Product (WSDP - FastAPI REST Engine)

- **Denominazione:** DPaaS WSDP Microservice Engine.
- **Funzione svolta nel processo:** Esposizione del catalogo dati e delle entità descrittive tramite interfacce standard RESTful verso la piattaforma centrale e i sistemi esterni.
- **Fase della pipeline:** Fase di distribuzione, consultazione e consumo del Data Product.
- **Modalità di integrazione:** Microservizio web asincrono integrato con il proxy di sicurezza e il catalogo pubblico di DPaaS.
- **Input / Output:**
  - *Input:* Richieste HTTP GET parametrizzate (filtri di paginazione, identificativi risorsa, soglie dimensionali);
  - *Output:* Risposte strutturate in formato JSON (modelli `ImageListResponse`, `ImageDetail`, `ImageSummary`) e stream binari per le maschere `.tif`.
- **Configurazioni adottate:** Validazione automatica dei payload con modelli Pydantic, documentazione OpenAPI / Swagger generata nativamente, gestione paginazione predefinita (20 elementi/pagina).

3.2. Eventuali tecnologie esterne a DPaaS

Per le fasi propedeutiche di rilievo sul campo e per la preparazione specialistica dei formati preliminari, vengono impiegate tecnologie esterne alla piattaforma:

Tecnologie esterne a DPaaS

Tecnologia / Strumento	Fornitore / Riferimento	Funzione Svolta	Modalità di Scambio Dati con DPaaS	Motivazione dell'Adozione Esterna
Sistemi di acquisizione termografica stazionaria	Fornitori hardware specialistici	Acquisizione di matrici radiometriche di temperatura superficiale delle pareti storiche.	Esportazione dei rilievi su storage locale e successivo trasferimento sicuro verso il bucket S3.	Hardware specialistico operante in situ presso il cantiere archeologico

				delle Terme Femminili.
Librerie di elaborazione scientifica (Python, NumPy, OpenCV)	Open Source Foundation	Esecuzione di routine di image processing: verifica conformità matrice 1280 x 1024, calcolo scheletro morfologico, estrazione Bounding Box e conversione metrica.	Eseguite all'interno del container DP Lab durante la fase di normalizzazione dei dati.	Standard de-facto per il calcolo scientifico e l'elaborazione raster ad alte prestazioni.

Dipendenze e vincoli operativi

- **Vincoli tecnici e di formato:** Tutte le elaborazioni esterne devono obbligatoriamente convergere sul vincolo geometrico di 1280 x 1024 **pixel** e produrre maschere binarie conformi a 1-bit, pena lo scarto automatico da parte del modulo di controllo conformità del DP Lab.
- **Sicurezza e tracciabilità:** Il trasferimento dei dati dai sistemi esterni al DP Lab avviene esclusivamente attraverso canali cifrati con protocolli sicuri (SFTP / HTTPS / S3 TLS) e verifica checksum (SHA-256) per garantire l'integrità del dato diagnostico.

4. Pipeline di elaborazione e trasformazione

La presente sezione descrive in sequenza ordinata le fasi attraverso cui i dati radiometrici, ottici e le geometrie rilevate sul campo vengono acquisiti, validati, elaborati, trasformati e strutturati all'interno del Data Product Lab (DP Lab) per la costituzione del Data Product **"Fessurazioni visibili annotate"**.

L'intera pipeline opera secondo un'architettura deterministica e modulare a blocchi funzionali, orientata alla conservazione dell'accuratezza metrica, all'integrità del dato fisico e alla standardizzazione dei formati verso il catalogo della piattaforma DPaaS.

4.1 Schema logico del flusso di elaborazione

Il flusso complessivo di acquisizione, elaborazione metrica, archiviazione ed esposizione è articolato nelle seguenti macro-fasi sequenziali:

1. **Ingestione e Validazione Formale d'Ingresso:** Acquisizione dei rilievi di campo, verifica integrità file (SHA-256) e controllo rigido della risoluzione (1280 x 1024 pixel).
2. **Normalizzazione Radiometrica e Co-registrazione Spaziale:** Conversione a matrice numerica aperta a 16-bit, calibrazione dell'emissività dei materiali murari e allineamento geometrico/omografico con il canale visibile.
3. **Rasterizzazione e Calcolo dei Descrittori Morfometrici:** Generazione delle maschere binarie 1-bit (Ground Truth), estrazione dello scheletro morfologico
4. **Strutturazione Relazionale e Archiviazione Binari:** Upload su Object Storage S3 (struttura a cartelle dedicate) e persistenza transazionale ACID su PostgreSQL (tabelle `Image`, `Annotation`, `ImageSummary`, `ImageDetail`).
5. **Esposizione e Pubblicazione nel Catalogo WSDP:** Configurazione dei modelli OpenAPI/Pydantic e attivazione dei servizi RESTful per il consumo a catalogo.

4.2 Fasi dettagliate della pipeline

Fase 1: Ingestione e Validazione Formale d'Ingresso

- **Descrizione:** Ricezione e primo controllo formale dei pacchetti dati caricati a seguito delle campagne diagnostiche condotte sul sito delle Terme Femminili.
- **Dati in ingresso:**
  - Matrici visibili radiometriche grezze esportate dalle stazioni di rilievo stazionarie;
  - Immagini fotografiche nel visibile ad alta risoluzione;
  - Metadati descrittivi di rilievo (temperatura e umidità dell'aria, coefficiente di scala reale `pixel_to_mm`).
- **Operazioni eseguite:**
  - Verifica dell'integrità fisica e della consistenza dei file tramite calcolo dell'hash SHA-256;
  - Controllo di conformità geometrica: ammissione esclusiva di matrici raster con risoluzione esatta pari a 1280 x 1024 pixel;
  - Parsing e validazione sintattica dei file descrittivi JSON associati.
- **Regole di trasformazione:**
  - Scarto immediato di qualsiasi file corrotto o con header TIFF non conforme;
  - Controllo di validità del parametro metrico di calibrazione (pixel to mm > 0).
- **Tecnologie utilizzate:** DPaaS Compute Lab Container, script di automazione Python (librerie Pillow, NumPy).
- **Dati in uscita:** Pacchetto dati grezzo validato e associato a un identificativo univoco transitorio di sessione.
- **Gestione degli errori e anomalie:** I file con risoluzione diversa da 1280 x 1024 pixel o privi dei parametri metrici fondamentali vengono rigettati con emissione di codice di errore bloccante (`ERR_INVALID_RESOLUTION` o `ERR_METADATA_MISSING`).
- **Controlli di qualità (QA/QC):** Check automatico della conformità della profondità di bit e del numero di canali colore.

Fase 2: Normalizzazione Radiometrica e Co-registrazione Spaziale

- **Descrizione:** Trattamento numerico delle matrici termografiche di temperatura superficiale e perfetto allineamento geometrico tra le acquisizioni visibili e il canale ottico.
- **Dati in ingresso:** Matrici radiometriche e immagini nel visibile validate nella Fase 1.
- **Operazioni eseguite:**

  - Normalizzazione dell'intervallo radiometrico ed esportazione in matrice numerica aperta a 16-bit non compressa;
  - Applicazione della matrice di trasformazione omografica per compensare le distorsioni prospettiche d'inquadratura rispetto al piano murario;
  - Co-registrazione spaziale per assicurare che il pixel (x, y) della matrice visibile coincida esattamente con il medesimo punto geometrico della superficie.
- **Regole di trasformazione:**
  - Riorganizzazione della matrice secondo lo spazio colore radiometrico standard;
  - Conservazione rigida della griglia 1280 x 1024 senza interpolazioni distorsive.
- **Tecnologie utilizzate:** routine di omografia e manipolazione matriciale (OpenCV, Scikit-Image).
- **Dati in uscita:** File raster `.tif` normalizzato a 1280 x 1024 pixel
- **Gestione degli errori e anomalie:** In caso di mancata convergenza dell'allineamento geometrico tra i due canali, il record viene sospeso con marcatura `ERR_REGISTRATION_FAILED` per verifica dell'operatore.
- **Controlli di qualità (QA/QC):** Ispezione dell'istogramma radiometrico e verifica dell'assenza di pixel saturi accidentali o discontinuità numeriche spurie.

Fase 3: Rasterizzazione e Calcolo dei Descrittori Morfometrici

- **Descrizione:** Generazione delle maschere binarie certificate (Ground Truth) a partire dai rilievi vettoriali ed estrazione analitica di tutti i parametri dimensionali della lesione.
- **Dati in ingresso:** Poligoni vettoriali validati e parametro di scala metrica `pixel_to_mm`.
- **Operazioni eseguite:**
  - Rasterizzazione dei perimetri poligonali su matrice binaria a singolo bit (`1` per i pixel della fessura, `0` per la matrice muraria sana);
  - Riconoscimento delle componenti connesse ed etichettatura univoca per ogni singola fessura;
  - Calcolo del rettangolo minimo contenitore (Bounding Box: x, y, w, h);
  - Estrazione dello scheletro morfologico (medial axis) mediante algoritmi deterministici di assottigliamento topologico;
- **Regole di trasformazione:**
  - Eliminazione dei disturbi isolati non connessi con superficie inferiore a 5 px^2;

    - Chiusura topologica per evitare micro-interruzioni non presenti nel rilievo originario.
- **Tecnologie utilizzate:** Python (Scikit-Image `morphology`, SciPy, OpenCV).
- **Dati in uscita:**
    - Maschera binaria 1-bit in formato `.tif` (1280 x 1024);
    - File strutturato JSON contenente i parametri morfometrici calcolati per ogni lesione.
- **Gestione degli errori e anomalie:** Blocco dell'elaborazione per geometrie auto-intersecanti o valori metrici non congruenti.
- **Controlli di qualità (QA/QC):** Verifica del rapporto di sovrapposizione tra la maschera rasterizzata e il perimetro vettoriale originario.

Fase 4: Strutturazione Relazionale e Archiviazione Binari

- **Descrizione:** Persistenza fisica sicura dei file pesanti su storage distribuito a oggetti e salvataggio dei metadati descrittivi e dimensionali sul database relazionale.
- **Dati in ingresso:** File raster TIFF normalizzati, maschere binarie 1-bit, file JSON dei descrittori dimensionali e log di sessione.
- **Operazioni eseguite:**
    - Caricamento delle risorse binarie su Object Storage S3, organizzate nella gerarchia:
        - `/images/`: immagini raster normalizzate `.tif`;
        - `/annotations/`: maschere binarie 1-bit `.tif`;
        - `/descriptors/`: file JSON con i metadati di rilievo;
    - Generazione degli URI persistenti per ciascun asset;
    - Apertura di una transazione ACID sul database PostgreSQL per il popolamento coordinato delle tabelle del modello dati:
        - **`Image`:** identificativo univoco (`ImageId`), timestamp di acquisizione, risoluzione (1280 x 1024), URI S3 del raster;
        - **`Annotation`:** associazione della maschera 1-bit, URI S3 della maschera e attributi dimensionali aggregati;
        - **`ImageSummary`:** persistenza dei valori riassuntivi dell'immagine (numero totale di fessure, area massima in mm^2, lunghezza massima in mm);
        - **`ImageDetail`:** dettaglio analitico di ogni singola fessura (identificativo, coordinate Bounding Box x, y, w, h, area e lunghezza puntuali).
- **Regole di trasformazione:**

  - Rigido vincolo di integrità referenziale (`ImageId` -> `AnnotationId`);
  - Memorizzazione dei campi geometrici con tipo di dato numerico ad alta precisione (Double Precision).
- **Tecnologie utilizzate:** DPaaS Object Storage S3, DPaaS Relational Database Service (PostgreSQL), driver psycopg2/SQLAlchemy.
- **Dati in uscita:** Database PostgreSQL popolato e indicizzato; bucket S3 aggiornato con risorse binarie pronte alla fruizione.
- **Gestione degli errori e anomalie:** Esecuzione di rollback completo della transazione sul database in caso di mancato upload o errore di rete verso S3, per impedire la persistenza di record orfani.
- **Controlli di qualità (QA/QC):** Check di coerenza referenziale automatizzato tra gli URI salvati nel database e l'effettiva presenza dell'oggetto nel bucket S3.

Fase 5: Esposizione e Pubblicazione nel Catalogo WSDP

- **Descrizione:** Attivazione dei canali di distribuzione e pubblicazione delle schede descrittive del Data Product nel catalogo dell'Ecosistema Ecomic.
- **Dati in ingresso:** Tabelle, viste e indici relazionali di PostgreSQL, file binari archiviati su S3.
- **Operazioni eseguite:**
  - Registrazione e validazione dei modelli di risposta RESTful tramite schemi dati Pydantic;
  - Configurazione dei filtri di ricerca, paginazione e ordinamento per soglie dimensionali;
  - Esposizione controllata delle entità per il catalogo DPaaS.
- **Regole di trasformazione:**
  - Formattazione delle risposte in JSON conforme allo standard OpenAPI 3.0;
  - Generazione automatica di presigned URL a tempo per l'accesso sicuro e diretto ai file binari pesanti.
- **Tecnologie utilizzate:** DPaaS WSDP Microservice Engine (FastAPI), API Gateway DPaaS.
- **Dati in uscita:** Endpoint RESTful attivi (`/images`, `/images/{id`, `/images/{id/annotation`) e documentazione interattiva Swagger accessibile.
- **Gestione degli errori e anomalie:** Restituzione di codici di stato HTTP standard (404 Not Found, 422 Unprocessable Entity per parametri di filtro non validi, 500 Internal Server Error).
- **Controlli di qualità (QA/QC):** Esecuzione di verifiche automatiche di disponibilità (health check su `/health`) prima dell'instradamento delle richieste.

4.3 Modalità e frequenza di esecuzione

- **Modalità operativa:** La pipeline opera in modalità **Batch pianificata e On-Demand**:
  - *On-Demand:* Eseguita al termine delle singole campagne diagnostiche sul campo per il caricamento, la validazione e l'indicizzazione dei nuovi rilievi;
  - *Batch:* Esecuzione periodica programmata per la verifica di integrità dell'archivio, la rigenerazione degli indici e l'allineamento dei metadati aggregati di sintesi.
- **Prestazioni medie di elaborazione:** Circa 2 - 5 secondi per singolo rilievo (comprensivo di controlli formali, morfometria, archiviazione S3 e persistenza sul database).

5. Esposizione e distribuzione

La presente sezione descrive i canali, i modelli informativi e i servizi attraverso cui il Data Product **"Fessurazioni visibili annotate"** viene pubblicato a catalogo all'interno dell'Ecosistema Digitale per la Cultura (**Ecomic**) e reso fruibile agli utenti autorizzati e ai sistemi applicativi cooperanti.

L'accesso alle risorse è strutturato per consentire sia l'estrazione massiva dei dati storici certificati (dataset per analisi scientifica e conservativa), sia l'interrogazione granulare e programmata mediante API RESTful, sia la consultazione visiva e aggregata tramite cruscotti di monitoraggio e visualizzatori dedicati.

5.1 Canali di accesso e requisiti generali di fruizione

- **Canale primario di accesso:** Catalogo Pubblico DPaaS (Data Product as a Service) dell'infrastruttura Ecomic.
- **Profili di utenza e sistemi destinatari:**
  - Funzionari di tutela, conservatori del patrimonio e archeologi del Parco Archeologico di Pompei;
  - Ingegneri strutturisti e specialisti di diagnostica non distruttiva (NDT) del Politecnico di Bari (DICAR) e di altri istituti accademici autorizzati;
  - Sistemi applicativi di Livello 3 (applicativi GIS, piattaforme HBIM, cruscotti integrati di monitoraggio dello stato di salute strutturale).
- **Modalità di autenticazione e autorizzazione:** L'accesso alle risorse a catalogo è regolato tramite protocollo di autenticazione OAuth 2.0 / OpenID Connect con token JWT (*JSON Web Token*). Le chiamate API richiedono l'intestazione di autorizzazione (`Authorization: Bearer <token>`) e rispettano i profili di permessi associati all'identità digitale dell'utente o del client machine-to-machine.
- **Formati disponibili:**
  - Dati tabellari e metadati: JSON standard conforme a specifiche OpenAPI 3.0 / Pydantic;
  - Matrici radiometriche e ottiche: TIFF a 16-bit non compresso a risoluzione standard 1280 x 1024 pixel;
  - Maschere di segmentazione fessurativa: TIFF a 1-bit e PNG a 8-bit (palette indicizzata);

- Geometrie vettoriali: GeoJSON / WKT per coordinate poligonali e Bounding Box.

5.2 Modalità di fruizione tramite Dataset

La modalità dataset consente lo scaricamento di pacchetti informativi autosufficienti, contenenti l'intero archivio o selezioni temporali/spaziali di rilievi per studi approfonditi di meccanica delle murature storiche.

5.2.1 Organizzazione logica e formato dei file

Il pacchetto dati è strutturato in una gerarchia di cartelle standardizzata:

- `/images/`: archivio dei raster radiometrici normalizzati in formato `.tif` (1280 x 1024 pixel, 16-bit);
- `/annotations/`: maschere binarie di segmentazione pixel-wise in formato `.tif` (1-bit Ground Truth, dove il pixel `1` identifica la lesione e `0` il supporto murario integro);
- `/descriptors/`: file strutturati in formato `.json` recanti i parametri dimensionali, le coordinate Bounding Box e le condizioni al contorno registrate al momento del rilievo;
- `manifest.json`: file descrittivo con l'inventario completo degli asset inclusi, gli hash crittografici SHA-256 e i timestamp di generazione.

5.2.2 Struttura delle entità e schema relazionale

I dati strutturati sono normalizzati nelle seguenti tabelle logiche:

Entità

Tabella / Entità	Descrizione logica	Chiave Primaria	Chiavi Esterne / Relazioni
`Image`	Rilievo fotografico/termografico acquisito sulla parete	`ImageId` (UUID)	-

Annotation	Maschera binaria 1-bit associata al rilievo	AnnotationId (UUID)	ImageId \rightarrow Image.ImageId
ImageSummary	Sintesi metrica complessiva dell'inquadratura	SummaryId (UUID)	ImageId \rightarrow Image.ImageId
ImageDetail	Dettaglio analitico puntuale della singola fessura	DetailId (UUID)	AnnotationId \rightarrow Annotation.AnnotationId

5.2.3 Dizionario dati dei principali campi

Dettagli entità

Entità	Nome Campo	Tipo Dato	Obbl.	Unità di Misura	Valori Ammessi / Note
Image	image_id	String (UUID)	Sì	-	Identificativo univoco del rilievo
Image	acquisition_ts	DateTime	Sì	UTC	Timestamp ISO 8601 di scatto
Image	resolution_w	Integer	Sì	pixel	Vincolato a 1280
Image	resolution_h	Integer	Sì	pixel	Vincolato a 1024

Image	`pixel_to_mm`	Float	Sì	mm/px	Coefficiente metrico (> 0)
Image	`image_s3_uri`	String (URI)	Sì	-	Percorso univoco su bucket S3
ImageSummary	`total_cracks`	Integer	Sì	conteggio	Numero di fessure rilevate (\ge 0)
ImageSummary	`max_area`	Float	Sì	mm^2	Area massima riscontrata nel frame
ImageSummary	`max_length`	Float	Sì	mm	Lunghezza massima riscontrata
ImageDetail	`crack_id`	Integer	Sì	progressivo	Identificativo fessura nel frame
ImageDetail	`bbox_x`, `bbox_y`	Integer	Sì	pixel	Coordinate origine Bounding Box
ImageDetail	`bbox_w`, `bbox_h`	Integer	Sì	pixel	Larghezza e altezza Bounding Box

ImageDetail	`area_px`	Integer	Sì	px^2	Area in pixel della maschera
ImageDetail	`area_mm2`	Float	Sì	mm^2	Area reale in millimetri quadrati
ImageDetail	`length_mm`	Float	Sì	mm	Lunghezza reale dell'asse medio

- **Gestione dei valori mancanti:** I campi metrici e geometrici non ammettono valori `NULL`. In assenza di fessurazioni su una matrice integra, `total_cracks` assume valore `0`, `max_area` e `max_length` assumono valore `0.0`, e non vengono generati record figli in `ImageDetail`.

5.3 Modalità di fruizione tramite Web Service API (WSDP)

Il Web Service Data Product (WSDP), implementato mediante framework FastAPI, espone interfacce RESTful ad alte prestazioni per l'integrazione con sistemi machine-to-machine.

5.3.1 Funzionalità e operazioni messe a disposizione

L'API permette ai consumatori autorizzati di effettuare le seguenti operazioni:

1. **Verifica stato del servizio:** Controllo continuo dell'operatività del backend, della connessione al database PostgreSQL e della raggiungibilità dello storage S3 via endpoint di *health check*.
2. **Consultazione del catalogo rilievi con filtri avanzati:**
   - Paginazione controllata (`page`, `size`);
   - Ordinamento per data di acquisizione o ampiezza del quadro fessurativo;
   - Filtraggio per soglie dimensionali minime (es. isolamento delle immagini con superficie fessurata superiore a N mm^2 o lunghezza > L mm).

3. **Recupero del record di dettaglio:** Interrogazione analitica dei metadati completi associati a un rilievo, comprendente la lista ordinata di tutte le singole lesioni, le coordinate del rettangolo contenitore (x, y, w, h) e i parametri metrici derivati.
4. **Accesso diretto agli asset binari:** Generazione e restituzione di stream binari diretti o *presigned URL* a scadenza per il recupero delle matrici visibili originali `.tif` e delle maschere Ground Truth a 1-bit.

5.3.2 Modello ad alto livello delle risorse

Di seguito si riportano le principali risorse funzionali esposte dal WSDP:

Risorse ad alto livello

Risorsa / Funzionalità	Metodo HTTP	Obiettivo Operativo	Tipo Risposta
Stato del servizio	`GET /health`	Validazione disponibilità nodi e backend	JSON (`HealthStatus`)
Elenco rilievi	`GET /images`	Ricerca e paginazione dei rilievi con filtri dimensionali	JSON (`ImageListResponse`)
Dettaglio rilievo	`GET /images/{id`	Recupero metadati analitici e metriche di sintesi	JSON (`ImageDetailResponse`)

Matrice visibile sorgente	`GET /images/{id/file`	Download raster normalizzato 1280 x 1024	Stream binario (`image/tiff`)
Maschera Ground Truth	`GET /images/{id/annotation`	Download maschera di segmentazione 1-bit	Stream binario (`image/tiff`)

5.3.3 Gestione degli errori e politiche di limitazione

- **Codici di stato HTTP standard:**
  - `200 OK`: Richiesta eseguita con successo;
  - `400 Bad Request`: Parametri di filtro o query sintatticamente scorretti;
  - `401 Unauthorized`: Token di autenticazione assente o non valido;
  - `403 Forbidden`: Privilegi insufficienti per la risorsa richiesta;
  - `404 Not Found`: Identificativo risorsa (`ImageId` o `AnnotationId`) inesistente;
  - `422 Unprocessable Entity`: Violazione dei vincoli di validazione dei modelli Pydantic;
  - `500 Internal Server Error`: Errore interno di elaborazione o disconnessione storage.
- **Rate Limiting:** Applicazione di limiti di frequenza pari a 100 richieste/minuto per client autenticato, al fine di garantire l'equa ripartizione delle risorse computazionali.

5.4 Nota sulle condizioni di condivisione, licenza e riutilizzo dei dati

In aderenza alle linee guida dell'Ecosistema Ecomic e alle disposizioni di legge in materia di tutela del patrimonio archeologico, la condivisione del Data Product è disciplinata dalle seguenti condizioni:

- **Soggetti autorizzati:** Enti di ricerca, atenei universitari, restauratori accreditati, organismi di tutela del Ministero della Cultura e soggetti attuatori del programma PNRR.

- **Natura dei dati trattati:** I dati contenuti nel Data Product riguardano esclusivamente rilievi fisici, radiometrici e geometrico-strutturali di manufatti archeologici. **Non sono presenti dati personali, dati sensibili o informazioni coperte da segreto di Stato.**
- **Regime di licenza:**
    - Tutti i metadati descrittivi, le schede dimensionali JSON e le maschere binarie di segmentazione sono rilasciati con licenza aperta per i beni culturali **CC BY-NC-SA 4.0** (*Creative Commons Attribuzione - Non Commerciale - Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale*).
- **Obblighi di attribuzione:** L'utilizzatore è tenuto a menzionare la titolarità del dato indicando: *"Politecnico di Bari (DICAR) - Parco Archeologico di Pompei - Realizzato nell'ambito del Progetto Ecomic PNRR M1C3 Inv. 1.1 Lotto 4"*.
- **Limitazioni di riutilizzo:** È vietato l'utilizzo del dataset o dei suoi derivati per finalità commerciali dirette senza preventiva autorizzazione degli enti titolari.
- **Livelli di condivisione:**
    - *Fruizione pubblica su catalogo:* Schede sintetiche, metadati generali e report riassuntivi aggregati;
    - *Fruizione autenticata:* Accesso completo alle API RESTful, alle matrici visibili radiometriche grezze normalizzate a 16-bit e alle maschere Ground Truth ad alta risoluzione.

5.6. Limitazioni

La presente sezione descrive in modo organico i limiti tecnici, informativi, metrologici, operativi e normativi che caratterizzano il Data Product **"Fessurazioni visibili annotate"**.

La conoscenza di tali vincoli consente ai consumatori del dato, ai conservatori e agli ingegneri strutturisti di interpretare correttamente i parametri restituiti ed evitare utilizzi impropri o non coerenti con la risoluzione spaziale e fisica dei rilievi.

Copertura geografica e temporale

- **Delimitazione spaziale:** Il Data Product è strettamente circoscritto a specifiche porzioni murarie e superfici affrescate all'interno del complesso delle **Terme Femminili del Parco Archeologico di Pompei** (con particolare riferimento alla Parete Nord e alle pareti con intercapedine radiante ceramica). Il dataset non include rilievi estesi ad altri edifici del sito o ad altri contesti archeologici.
- **Frequenza di campionamento e serie storiche:** I rilievi sono acquisiti tramite campagne diagnostiche discrete e non costituiscono una registrazione continua in tempo reale (*streaming continuo 24/7*). L'analisi comparativa multi-temporale è pertanto limitata alle date e alle epoche in cui sono state effettivamente condotte le scansioni termografiche in situ.
- **Dati mancanti per condizioni ambientali avverse:** Campagne di rilievo pianificate possono essere state rinviate o sospese in presenza di condizioni termo-igrometriche non idonee (es. elevata umidità di condensazione superficiale o gradienti termici naturali insufficienti), determinando finestre temporali prive di campionamento.

Vincoli geometrici, ottici e radiometrici

- **Vincolo rigido di risoluzione della griglia raster:** Tutte le matrici radiometriche normalizzate e le maschere binarie associate sono rigidamente vincolate alla risoluzione geometrica di 1280 x 1024 **pixel**. Matrici raster acquisite a risoluzioni differenti non possono essere ingerite direttamente nella pipeline senza preventiva ricampionatura controllata.
- **Dipendenza dalla stazionarietà e dall'angolo di presa:** L'attendibilità dell'estrazione geometrica e del confronto multi-temporale assume che le termocamere e i sensori ottici operino da postazioni fisse o con matrice di co-

registrazione omografica rigidamente calcolata. Spostamenti accidentali della postazione di scatto o variazioni dell'asse ottico rispetto alla perpendicolare della parete possono introdurre distorsioni prospettiche residue.

- **Influenza delle condizioni termo-igrometriche al contorno:** La termografia non distruttiva rileva le temperature superficiali. La visibilità radiometrica delle fessurazioni dipende dalla presenza di un gradiente termico minimo (stimato in almeno \Delta T > 1.0 ^\circC tra il labbro della fessura e la muratura adiacente). In condizioni di perfetto equilibrio termico isotermo o in assenza di stimolazione radiante, le micro-discontinuità potrebbero non presentare sufficiente contrasto radiometrico.
- **Emissività e riflessioni di fondo:** Sebbene le matrici siano corrette con coefficienti medi di emissività specifici per laterizi e intonaci antichi (circa 0.90 - 0.94), variazioni locali della composizione materica (es. patine biologiche, efflorescenze saline, trattamenti protettivi moderni) possono determinare minime eterogeneità nel dato di temperatura superficiale restituito.

Accuratezza metrica, approssimazioni e soglie di rilevabilità

- **Soglia minima di rilevabilità spaziale (risoluzione al suolo):** La dimensione minima rilevabile di una fessura è vincolata al valore del coefficiente di scala metrico pixel_to_mm (mm/px), determinato dalla distanza di posa e dalla focale dell'ottica. Discontinuità con ampiezza inferiore alla dimensione del singolo pixel (< 1 px) non possono essere misurate geometricamente.
- **Filtraggio delle micro-discontinuità e rumore:** La pipeline esclude deterministicamente le componenti connesse isolate con estensione < 5 px^2 per separare il rumore radiometrico di fondo dalle lesioni strutturali certe. Ne consegue che micro-porosità puntiformi non sono mappate come lesioni fessurative.
- **Approssimazione dello scheletro morfologico (Medial Axis):** Il calcolo della lunghezza metrica cumulativa tramite assottigliamento topologico fornisce un'eccellente approssimazione dell'asse medio della crepa, ma può risentire di minime approssimazioni di curvatura in corrispondenza di biforcazioni complesse ad albero o incroci multipli.

Prestazioni computazionali, fruizione e limiti di accesso

- **Volumetria e banda per il download dei file pesanti:** Le matrici visibili a 16-bit e i pacchetti di rilievo completi richiedono volumi di trasferimento considerevoli (circa 2.5 - 10 MB per singolo scatto). La velocità di estrazione massiva del dataset completo è subordinata alla banda di rete dell'utente e alla disponibilità dei canali dell'Object Storage S3.
- **Rate Limiting delle API WSDP:** L'infrastruttura applica una limitazione a tutela della stabilità del servizio pari a 100 richieste/minuto **per client autenticato**. Richieste con frequenza superiore generano risposte con codice di errore `429 Too Many Requests`.

Casi d'uso non supportati e vincoli d'uso

- **Non sostituibilità della perizia strutturale invasiva o collaudo statico:** Il Data Product fornisce descrittori dimensionali e radiometrici di supporto alla diagnostica preventiva. **Non sostituisce in alcun modo** saggi distruttivi, verifiche sismiche globali, calcoli di stabilità statica o perizie asseverate di agibilità che richiedano indagini meccaniche di profondità.
- **Superfici non planari o a geometria complessa:** Il fattore di conversione metrica `pixel_to_mm` è rigoroso per inquadrature planari e ortogonali. L'applicazione su volte a botte, cupole o superfici fortemente curvilinee senza ortorettificazione fotogrammetrica tridimensionale produce approssimazioni metriche non controllate.
- **Usi commerciali non autorizzati:** In conformità con la licenza **CC BY-NC-SA 4.0** e con il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (D.Lgs. 42/2004), è vietato l'impiego del dataset per lo sviluppo di prodotti commerciali a fini di lucro diretto senza il formale accordo con il Ministero della Cultura e il Politecnico di Bari.
-

6. Possibili evoluzioni future

La presente sezione descrive le linee di sviluppo, estensione e miglioramento incrementale individuate per il Data Product **"Fessurazioni visibili annotate"**.

Le proposte delineate derivano dalle esigenze operative emerse durante le campagne diagnostiche in situ e mirano ad ampliare il valore informativo del patrimonio di dati, la granularità temporale dei rilievi e l'interoperabilità con i sistemi di conservazione programmata del patrimonio culturale.

Le evoluzioni presentate non costituiscono vincoli contrattuali immediati, bensì una roadmap evolutiva per future implementazioni all'interno dell'Ecosistema **Ecomic**.

6.1 Quadro sinottico delle evoluzioni pianificate

Evoluzioni

Codice	Linea Evolutiva	Ambito di Intervento
EVO-01	Integrazione flussi microclimatici e stazioni meteo	Nuove fonti dati
EVO-02	Estensione della copertura spaziale alle altre sale termali	Copertura geografica
EVO-03	Automazione dell'acquisizione con postazioni NDT fisse	Automazione pipeline

6.2 Descrizione dettagliata delle singole evoluzioni

EVO-01: Integrazione con reti di sensori termo-igrometrici e dati meteo ambientali

- **Descrizione:** Correlazione sistematica delle matrici termografiche con i dati orari di temperatura, umidità relativa interna, punto di rugiada (*dew point*) e parametri meteorologici esterni (irraggiamento solare, piovosità, escursione termica giornaliera).
- **Beneficio atteso:** Permettere ai restauratori e agli ingegneri di correlare la dilatazione o l'apertura delle lesioni con i cicli termo-igrometrici ambientali stagionali, arricchendo i metadati del record `Image` con serie storiche ambientali continue.
- **Destinatari:** Conservatori del Parco Archeologico di Pompei, specialisti NDT e ricercatori universitari.
- **Dipendenze e prerequisiti:** Installazione e cablaggio/alimentazione di stazioni microclimatiche certificate a quota > 3.60 m (in conformità ai vincoli logistici del sito) e standardizzazione delle API di scambio dati con DPaaS.
- **Priorità: Alta**
- **Collocazione temporale:** Breve termine (6 mesi).

EVO-02: Estensione della copertura geografica ad altri ambienti archeologici

- **Descrizione:** Allargamento del protocollo di scansione e schedatura geometrica dalla sola Parete Nord e vani radianti ad altri settori delle Terme Femminili e ad ulteriori complessi murari adiacenti del Parco Archeologico di Pompei (es. Terme del Foro, Terme Stabiane).
- **Beneficio atteso:** Creazione di un archivio diagnostico uniforme e comparabile su scala urbana per l'intero sito archeologico, favorendo analisi statistiche sulle tecniche costruttive romane (*opus caementicium*, *opus incertum*, laterizi).
- **Destinatari:** Funzionari di tutela del Ministero della Cultura, archeologi, pianificatori della manutenzione ordinaria.
- **Dipendenze e prerequisiti:** Approvazione dei piani di rilievo da parte della Direzione del Parco e disponibilità di finestre temporali d'accesso prive di interferenze con i flussi di visitatori.
- **Priorità: Media**
- **Collocazione temporale:** Medio termine (12 mesi).

EVO-03: Automazione dell'acquisizione con postazioni diagnostiche semi-permanenti

- **Descrizione:** Transizione dalle campagne discrete manuali a postazioni diagnostiche stazionarie autonome (alimentate a batteria/accumulo e dotate di vettori di comunicazione a basso consumo come LoRaWAN o rete dedicata) per l'acquisizione automatizzata programmata.
- **Beneficio atteso:** Riduzione drastica dei tempi tra i rilievi, azzeramento degli errori di riposizionamento dell'asse ottico e campionamento ad alta densità temporale per il monitoraggio stagionale continuo.
- **Destinatari:** Direzione tecnica di cantiere, personale addetto alla sicurezza e al monitoraggio strutturale continuo.
- **Dipendenze e prerequisiti:** Risoluzione definitiva dei vincoli di alimentazione e connettività in situ; rilascio delle autorizzazioni paesaggistiche e conservative per l'installazione di staffe non invasive permanenti sopra quota 3.60 m.
- **Priorità: Bassa**
- **Collocazione temporale:** Lungo termine (24+ mesi).