



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Istituto Superiore per la
Conservazione e il Restauro

Valutazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni culturali architettonici di Roma





ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Istituto Superiore per la
Conservazione e il Restauro

Valutazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni culturali architettonici di Roma

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), le Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA), le Agenzie Provinciali per la Protezione dell'Ambiente (APPA) e le persone che agiscono per loro conto sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

ISPRA - L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
www.isprambiente.it

ISPRA, Rapporti 147/2011

ISBN 978-88-448-0516-6

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica
ISPRA

Grafica di copertina: Franco Iozzoli
Foto di copertina: Raffaella Gaddi

Coordinamento editoriale:
Daria Mazzella
ISPRA – Settore Editoria

Settembre 2011

Autori

Patrizia Bonanni (ISPRA)
Carlo Cacace (ISCR)
Giorgio Cattani (ISPRA)
Mariacarmela Cusano (ISPRA)
Antonella De Santis (ISPRA)
Alessandro Di Menno di Bucchianico (ISPRA)
Raffaella Gaddi (ISPRA)
Annamaria Giovagnoli (ISCR)
Cristina Sarti (ISPRA)

INTRODUZIONE.....	4
1. Il calcolo del rischio	5
1.1 Il modello di rischio	5
2. Il degrado dei beni culturali: l'erosione	7
3. La vulnerabilità dei beni culturali	9
3.1 I beni di Roma e la loro vulnerabilità.....	10
4. Il calcolo dell'erosione superficiale	15
4.1 I dati meteorologici e le concentrazioni degli inquinanti atmosferici	15
4.2 La ricostruzione delle serie di dati mancanti.....	17
4.3 Il calcolo dell'erosione nei pressi delle centraline	20
4.4 La spazializzazione dei dati di concentrazione degli inquinanti	22
4.4.1 Spazializzazione di NO ₂	23
4.4.2 Spazializzazione di O ₃	23
4.4.3 Spazializzazione di HNO ₃	24
4.4.4 Spazializzazione di PM ₁₀	24
4.4.5 Spazializzazione di SO ₂	25
4.4.6 Confronto tra i dati misurati e calcolati.....	25
4.5 Il calcolo dell'erosione nell'area delimitata dalle centraline	27
5. Il calcolo degli indicatori di rischio.....	28
5.1 Il rischio territoriale.....	28
5.2 Il rischio individuale.....	29
CONCLUSIONI.....	31
BIBLIOGRAFIA.....	32

INTRODUZIONE

I monumenti, come tutti i materiali a contatto con l'ambiente che li circonda, sono sottoposti ad un lento e progressivo deterioramento accelerato dal contributo dei fattori climatici e dell'inquinamento atmosferico.

Lo studio del fenomeno è reso complesso dalle difficoltà nel separare i contributi dei vari agenti di degrado poiché nessun fattore agisce singolarmente; l'effetto di ognuno viene infatti influenzato dalla presenza concomitante degli altri.

Inoltre la quantità e la qualità degli inquinanti in una determinata area non dipendono solo dal tipo delle sorgenti che su quella area hanno la massima ricaduta, ma anche dalle caratteristiche topografiche e dalle condizioni meteorologiche. L'effetto osservato è quindi il frutto di una sinergia di più fattori.

Le tipologie di degrado riscontrabili sui beni culturali dipendono inoltre dalla composizione e dalla natura dei materiali che li costituiscono; i monumenti calcarei, che verranno analizzati nel presente lavoro, sono per esempio più soggetti ai fenomeni di erosione e di annerimento, ai processi di gelo, disgelo, cristallizzazione e dissoluzione dei sali e al biodeterioramento.

In questo studio è stata analizzata l'erosione (recessione superficiale) dei beni architettonici di Roma, espressa come perdita di materiale e misurata in $\mu\text{m}/\text{anno}$.

L'erosione è stata calcolata in corrispondenza delle centraline di monitoraggio della qualità dell'aria utilizzando i parametri climatici (precipitazioni e umidità relativa), ed ambientali (concentrazione in aria di inquinanti atmosferici) misurati nella città nel 2009.

Le concentrazioni degli ossidi di azoto, del biossido di zolfo e del particolato atmosferico sono state inoltre spazializzate, mediante tecniche di interpolazione geostatistica, per ottenere una stima della potenziale perdita di materiale nell'area delimitata dalle stazioni di monitoraggio all'interno del Grande Raccordo Anulare.

I risultati del calcolo della recessione superficiale sono stati successivamente correlati ai dati relativi allo stato di conservazione dei beni georeferiti, sovrapponendo le mappe di erosione alla distribuzione dei monumenti presenti sul territorio.

Questo metodo ha consentito di valutare quali siano attualmente i beni maggiormente esposti all'aggressione territoriale e potenzialmente soggetti ad un rischio di erosione più elevato.

1. IL CALCOLO DEL RISCHIO

Nella probabilità che un evento dannoso si verifichi, il rischio viene definito, da un punto di vista statistico, mettendo in relazione la *quantità di danno* su un determinato oggetto o individuo della popolazione considerata e l'evento che lo produce [1].

Nell'ambito storico- artistico, l'applicazione di un modello di rischio rigorosamente statistico non è possibile, in quanto bisognerebbe definire a priori sia l'evento dannoso sia il contesto stocastico in cui l'evento può avvenire (meccanismo probabilistico che genera l'evento). Se si considera che il danno subito da un bene è il risultato di un processo di deterioramento non scomponibile in eventi elementari esprimibili solo in termini probabilistici e che il meccanismo secondo cui si produce il danno coinvolge un elevato numero di variabili legate tra di loro in modo articolato e complesso, è facile accorgersi che l'ambito storico- artistico non consente una misura del rischio in tali termini.

Sono state quindi individuate le variabili fisiche e sociali che influiscono sul processo di deterioramento da utilizzare nella quantificazione del rischio, ponendo in relazione funzionale il Rischio con i Fattori di Rischio.

1.1 Il modello di rischio

Il modello di rischio descritto nella Carta del Rischio del Patrimonio Culturale [1] è stato costruito individuando tre *domini di pericolosità*: statico – strutturale, ambientale – aria e antropico.

La pericolosità indica il livello di potenziale aggressione caratteristico di una data area territoriale, indipendentemente dalla presenza o meno di beni.

Sulla base di questa definizione, il *rischio statico – strutturale*, per esempio, descrive il degrado del materiale legato a fenomeni correlati alla statica dei beni (sismi, frane, dissesti, valanghe, ecc.). Il *rischio ambientale – aria*, invece, rappresenta il danno subito dai materiali a causa dei fattori climatici e ambientali (inquinamento atmosferico) caratteristici del territorio in cui i monumenti sono collocati.

Il *rischio antropico* è connesso ai fattori legati alla presenza dell'uomo che possono modificare lo stato di conservazione del bene o alterare il contesto in cui esso si trova (densità demografica, l'"abbandono" di aree o centri abitati, la concentrazione urbana dell'edificato, i flussi turistici, i visitatori di opere d'arte, il numero dei furti).

Il modello si basa inoltre sulla suddivisione del rischio in tre livelli: territoriale, individuale e locale [2].

Il *rischio territoriale* fa riferimento "allo stato di suscettibilità al processo di degrado che caratterizza il territorio nel quale è collocato un *aggregato* di beni". Questo indicatore è quindi calcolato in funzione dei livelli di pericolosità territoriale e delle caratteristiche dell'aggregato di beni considerato (per esempio il numero di monumenti, la tipologia, ecc.).

$$R_t = n \cdot P \quad (1)$$

P = Pericolosità territoriale stimata a livello comunale

n = numero di beni georeferiti sul territorio

Il *rischio individuale* si riferisce "allo stato di suscettibilità al processo di degrado di un singolo bene" ed è rappresentato dal prodotto tra la pericolosità a livello di comune (P) e la vulnerabilità (V_k) del bene k-esimo presente sul territorio in quel dato comune.

$$R_i = V_k \cdot P \quad (2)$$

P = Pericolosità territoriale stimata a livello comunale

V_k = vulnerabilità del bene k-esimo

Il *rischio locale* si riferisce, come quello Individuale, al singolo bene, ma la pericolosità viene calcolata a livello locale sub-comunale, moltiplicando la pericolosità (P_j) nell'intorno del bene, per la vulnerabilità (V_k) del bene stesso [3].

$$R_l = V_k \cdot P_j \quad (3)$$

P_j = Pericolosità territoriale stimata nei pressi del bene

V_k = vulnerabilità del bene

Nel presente lavoro sono stati calcolati gli indicatori di rischio territoriale ed individuale nel dominio di pericolosità ambientale- aria.

La pericolosità ambientale aria, è definita, nella Carta del Rischio da tre indici di pericolosità che rappresentano tre diversi fenomeni di degrado: l'annerimento, lo stress fisico e l'erosione.

In questo studio verrà esaminato, come già detto, il *degrado da erosione*.

2. IL DEGRADO DEI BENI CULTURALI: L'EROSIONE

L'erosione (o recessione superficiale) dei materiali calcarei esposti all'aperto è generalmente quantificata in funzione delle deposizioni secche e umide degli inquinanti atmosferici (biossido di zolfo, ossidi di azoto e particolato atmosferico) [4].

La recessione superficiale, espressa in $\mu\text{m}/\text{anno}$, viene calcolata mediante l'utilizzo di specifiche funzioni di danno presenti in letteratura [5].

A titolo di esempio si riportano, la formula di Lipfert (4) [6], [7] e la funzione dose-risposta di Kucera (5) derivata nell'ambito del progetto Multiassess¹ (*Model for multi-pollutant impact and assessment of threshold levels for cultural heritage*) [8].

Formula di Lipfert

$$R = 18.8 \cdot \text{Rain} + 0.016 \cdot [\text{H}^+] \cdot \text{Rain} + 0.18 \cdot (V_{\text{ds}} \cdot [\text{SO}_2] + V_{\text{dN}} \cdot [\text{HNO}_3]) \quad (4)$$

con

R = recessione superficiale ($\mu\text{m}/\text{anno}$)

18.8 = coefficiente che rappresenta la solubilità di CaCO_3 in equilibrio con 330 ppm di CO_2

Rain = precipitazioni (mm/anno)

$[\text{H}^+]$ = concentrazione di ioni idrogeno (mg/l)

V_{ds} = velocità di deposizione di biossido di zolfo (cm/s)

$[\text{SO}_2]$ = concentrazione del biossido di zolfo in aria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

V_{dN} = velocità di deposizione di acido nitrico (cm/s)

$[\text{HNO}_3]$ = concentrazione di acido nitrico in aria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

in particolare:

- **18.8 • Rain**: contributo della pioggia pulita (il cosiddetto effetto carsico)
- **0.016 • $[\text{H}^+]$ • Rain**: effetto della pioggia acida (acidità dovuta alla presenza di ioni SO_4^{2-} , NO_3^-)
- **0.18 • V_{ds} • $[\text{SO}_2]$** : deposizione di SO_2
- **0.18 • V_{dN} • $[\text{HNO}_3]$** : deposizione di HNO_3

Funzione dose-risposta di Kucera

$$R = 4 + 0.0059 \cdot [\text{SO}_2] \cdot \text{Rh}_{60} + 0.054 \cdot \text{Rain} \cdot [\text{H}^+] + 0.078 \cdot [\text{HNO}_3] \cdot \text{Rh}_{60} + 0.0258 \cdot [\text{PM}_{10}] \quad (5)$$

con

R = recessione superficiale ($\mu\text{m}/\text{anno}$)

$[\text{SO}_2]$ = concentrazione di biossido di zolfo, SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$[\text{HNO}_3]$ = concentrazione di acido nitrico, HNO_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$[\text{PM}_{10}]$ = concentrazione di particolato atmosferico, PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Rh_{60} = umidità relativa Rh-60 (%)

$[\text{H}^+]$ = concentrazione di ioni idrogeno (mg/l)

Rain = precipitazioni (mm/anno)

in particolare:

- **4**: valore calcolato sperimentalmente che rappresenta il degrado in assenza di inquinanti
- **0.054 • Rain • $[\text{H}^+]$** : effetto della pioggia acida
- **0.0059 • $[\text{SO}_2]$ • Rh_{60}** : deposizione di SO_2

¹ La formula è stata ricavata sperimentalmente esponendo, per un anno, provini di calcare di Portland in alcune città europee.

- $0.078 \cdot [\text{HNO}_3] \cdot \text{Rh}_{60}$: deposizione di HNO_3

- $0.0258 \cdot [\text{PM}_{10}]$: deposizione di PM_{10}

Entrambi gli algoritmi calcolano la perdita di materiale in funzione delle deposizioni di biossido di zolfo (SO_2), acido nitrico (HNO_3) e delle precipitazioni acide ($\text{Rain} \cdot [\text{H}^+]$).

La formula di Lipfert (4), applicabile ad un generico materiale calcareo, sovrastima il contributo dell'effetto carsico e non considera l'apporto del particolato atmosferico le cui concentrazioni, nelle aree urbane, spesso eccedono i limiti di legge.

Per questo motivo nel presente lavoro, è stata applicata la formula di Kucera (5) perché descrive più realisticamente il potenziale danno da erosione in un'area urbana (come Roma) in cui, oltre ai parametri climatici, alcuni inquinanti, in particolare gli ossidi di azoto e il particolato atmosferico (PM_{10}), forniscono un contributo significativo al processo di perdita di materiale (*multi-pollutant situation*) [8].

3. LA VULNERABILITÀ DEI BENI CULTURALI

La *vulnerabilità* per i beni culturali è una funzione che indica il livello di esposizione di un dato bene all'aggressione dei fattori territoriali ambientali in base allo stato di conservazione del bene. Per il calcolo vengono elaborate le informazioni acquisite attraverso un modello schedografico che rileva i dati sullo stato di conservazione dei 12 elementi costruttivi e decorativi in cui è suddiviso il bene [9]:

- Fondazioni (anche se difficilmente ispezionabili)
- Strutture in Elevazione
- Strutture di Orizzontamento
- Coperture
- Collegamenti Verticali
- Pavimenti Interni
- Pavimenti Esterni
- Rivestimenti
- Apparato Decorativo Interno
- Rivestimenti e Decorazioni Esterne
- Infissi interni
- Infissi esterni



Ad ogni elemento è associata la stima di 6 tipologie di danno

- Danno generico
- Disgregazione materiali
- Umidità
- Attacchi biologici
- Alterazione strati superficiali
- Parti mancanti



Ogni tipologia di danno, presente per ogni elemento, si classifica graduando

- Gravità
- Estensione
- Grado di urgenza

secondo una scala di intensità suddivisa in più livelli.

Per stimare la vulnerabilità di un manufatto, i dati reperiti durante le fasi di schedatura vengono inseriti nell'algoritmo (6) per il calcolo dell'indice di vulnerabilità $IND_{vul(k)}$:

$$IND_{vul(k)} = \text{SOMMA} (P_j \cdot Q_{ji} / (m-n) \cdot (\text{cost}/m)) \quad (6)$$

con

$IND_{vul(k)}$ = indice di vulnerabilità del bene k-esimo

m = numero di variabili considerate per quantificare lo stato di conservazione della superficie in base al grado di urgenza, gravità ed estensione che più tipologie di danno possono assumere in relazione agli elementi che caratterizzano l'aspetto "superficiale" del bene

n = numero di variabili per le quali mancano informazioni

P_j = peso relativo alla variabile j-esima

Q_{ji} = valore i-esimo assunto dalla variabile j-esima

cost/m = cost. aggiornata in base all'aggiornamento dei pesi

Il valore ottenuto (espresso in unità arbitrarie) indica lo stato di conservazione del monumento considerato. Minore è il valore della vulnerabilità e migliore è lo stato di conservazione del bene.

CALCOLO DELLA VULNERABILITÀ

Il calcolo della vulnerabilità ha come assunzione di base che il degrado costituisce esso stesso la manifestazione concreta della vulnerabilità, che risulta essere una dimensione latente, misurabile solo direttamente, tramite i vari aspetti del deterioramento stesso [10].

La misura del degrado (gravità, estensione e urgenza), le 6 tipologie di danno e i 12 elementi tipologici del bene architettonico definiscono una matrice di $3 \times 6 \times 12 = 216$ variabili su cui viene calcolata la vulnerabilità.

La vulnerabilità, in quanto misura latente, è stata studiata tramite l'analisi in componenti principali di tipo ordinale, che portano a tre risultati: 1) ad una quantificazione delle modalità (ordinate) delle diverse variabili, funzionali alla determinazione delle componenti latenti; 2) ad un insieme di coefficienti che misurano il peso che ciascuna variabile (nel suo complesso) ha, rispetto alla componente latente (vulnerabilità); 3) i valori numerici assunti dalla componente latente su ciascuna unità statistica, ossia su ciascun bene oggetto di analisi.

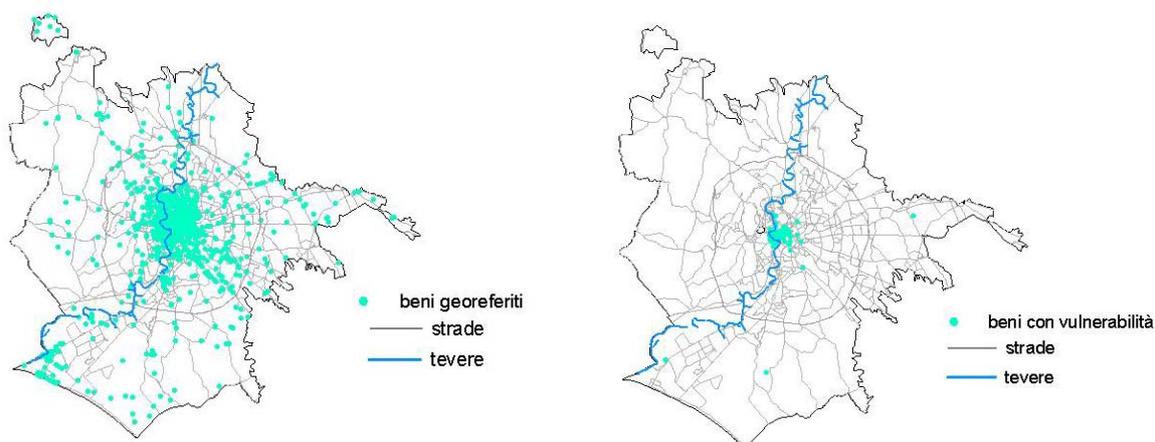
All'inizio del progetto Carta del Rischio (1992 -1996), tutto il campione di dati delle schede raccolte fu sottoposto alla tecnica Princals [11] con l'ausilio del modulo Categorie del package SPSS. L'analisi ha definito statisticamente i pesi da attribuire ai danni, in funzione dei 12 elementi costitutivi il bene architettonico. Nella definizione dei pesi, alcuni risultano negativi; questo comporta la possibilità di avere valori negativi finali di vulnerabilità, dato che non è possibile, allo stato attuale, effettuare processi di normalizzazione.

Potendo disporre di una scala ordinale di valori, i dati negativi tendono a rappresentare la classe di bassa vulnerabilità.

3.1 I beni di Roma e la loro vulnerabilità

I beni culturali architettonici ed archeologici presenti nel Sistema Informativo Territoriale (SIT) [12] della Carta del Rischio sono attualmente 3762 (fig.1). I beni sono principalmente concentrati al centro della città, nell'area compresa all'interno del Grande Raccordo Anulare (GRA). Tra il 1995 e il 2000, l'ISCR ha realizzato la schedatura conservativa di 77 beni architettonici (fig.2) elencati nella tabella 1 nella quale sono riportati anche i valori della vulnerabilità.

Figura 1 - Beni localizzati a Roma (fonte: ISCR) **Figura 2** - Beni con le schede di vulnerabilità (fonte: ISCR)



La figura 3 riporta, a titolo di esempio, la scheda della chiesa di S. Crisogono a Roma estratta dal data base della Carta del Rischio², nella quale vengono riportati dati relativi alla sua posizione geografica e al suo stato di conservazione (indici di vulnerabilità).

² <http://www.cartadelrischio.it/>

Figura 3 - Dati anagrafici e di vulnerabilità elaborati per la Chiesa di S. Crisogono a Roma (Fonte: ISCR)

Carta del Rischio								
Segretariato Generale								
Elenco dei risultati della ricerca								
Sono Stati Trovati 2 Record								
Lista Beni								
CODICI		LOCALIZZAZIONE					OGGETTO	
CDR	ICCD	PROVINCIA	COMUNE	FRAZIONE	LOCALITA'	INDIRIZZO	TIPO	DENOMINAZIONE
2ICR00239000000		Roma	ROMA				Chiesa/Plebana/Prepositurale/Prioria	CHIESA DI S. CRISOGONO
2ICR00239000004		Roma	ROMA				Chiesa	SAN CRISOGONO

Anagrafica Bene			
CODICI		UBVK	INDICAZIONE CHILOMETRICA
NCTI	CODICE DI SERVIZIO CDR	GDPX	LONGITUDINE SIGNIFICATIVA
	2ICR00239000004		1788260,11
NCTN	CODICE ICCD	GDPY	LATITUDINE SIGNIFICATIVA
			4643315,74
DATI AMMINISTRATIVI		GDPZ	ALTITUDINE SIGNIFICATIVA
			20
VINL	VINCOLATO LEGGE	OGGETTO	
CTSF	FOGLIO CATASTALE	OGTP	TIPO OGGETTO
			Chiesa
CTSN	PARTICELLE	OGTD	DENOMINAZIONE
			SAN CRISOGONO
CTSD	DATA FOGLIO CATASTALE	AUTN	AUTORE
AGGD	DATA - AGGIORNAMENTO SCHEDA	RVEL	GERARCHIA
	03/02/2006 11.42.45		Componente
LOCALIZZAZIONE		DATAZIONE	
NCTR	REGIONE	RELI	ESTREMO REMOTO DATA
	LAZIO		
PVCP	PROVINCIA	RELS	ESTREMO REMOTO SECOLO
	Roma		
PVCC	COMUNE	RELF	ESTREMO REMOTO FRAZIONE DI SECOLO
	ROMA		
PVCF	FRAZIONE	REVI	ESTREMO RECENTE DATA
PVCL	LOCALITA'	REVS	ESTREMO RECENTE SECOLO
UBVD	DENOMINAZIONE SPAZIO VIABILISTICO	REVF	ESTREMO RECENTE FRAZIONE DI SECOLO
UBVN	NUMERO CIVICO		

Indici		
	Indice Di Vulnerabilità	Indice Di Attendibilità
Globale	2.6929452419281	1
Strutturale	1.11027777194977	1
Superficiale	1.26530885696411	1

Tabella 1- Elenco dei beni per i quali sono disponibili i dati di vulnerabilità (espressa in u.a.) e la corrispondente classe di vulnerabilità

Bene	V (u.a.)	Classe V	Bene	V (u.a.)	Classe V	Bene	V (u.a.)	Classe V
Chiesa dei SS. Ambrogio e Carlo al Corso	-1,43	1	Chiesa di S. Cesare de Appia	-0,57	1	Chiesa di S. Maria in Campitelli	0,43	2
Chiesa di S. Vitale	-1,19	1	Museo Nazionale Preistorico ed Etnografico	-0,54	1	Chiesa di San Agostino	0,43	2
Museo dell'Alto Medioevo	-1,16	1	Chiesa di S.S. Quirico e Giulitta	-0,50	1	San Girolamo dei Croati	0,44	2
Chiesa di S. Bernardo alle Terme	-1,16	1	Chiesa di S. Maria in Monticelli	-0,47	1	Oratorio di S. Francesco Saverio detto del Caravita	0,44	2
Chiesa di S. Andrea al Quirinale	-1,13	1	Chiesa di S. Lorenzo in Panisperna	-0,45	1	Convento Chiesa S. Maria della Concezione	0,45	2
Villino Ximenes	-1,12	1	Palazzo Corsini	-0,44	1	Chiesa Santa Maria della Scala	0,46	2
Complesso Villa Giulia - Palazzo	-1,07	1	Chiostro di S. Maria della Pace	-0,41	1	Chiesa di S. Maria della Pace	0,54	3
Museo di Palazzo Venezia	-1,03	1	Chiesa di S. Pantaleo	-0,38	1	Complesso Aracoeli - Chiesa S. Maria in Aracoeli	0,57	3
Casa Madre dei Mutilati	-0,98	1	Santa Maria dei Miracoli	-0,36	1	Palazzine ex Gil	0,67	3
Farmacia di S. Ignazio	-0,98	1	Chiesa di S. Callisto	-0,24	1	Chiesa di S. Clemente Basilica inferiore	0,69	3
Oratorio di S. Giuseppe dei Falegnami	-0,97	1	Chiesa di S. Margherita	-0,23	1	Chiesa di S. Rocco	0,69	3
Chiesa di S. Maria in Via	-0,92	1	Palazzetto Leroy	-0,22	1	Chiesa di S. Urbano	0,74	3
Oratorio Mariano	-0,89	1	Cimitero dei Cappuccini	-0,13	1	Appartamento Secchi	0,87	3
Chiesa di S. Maria in Aquiro	-0,86	1	Chiesa di S. Maria in Trivio	-0,11	1	Chiesa di S. Nicola da Tolentino	0,88	3
Chiesa di S. Marcello al Corso	-0,85	1	Chiesa di S. Croce e S. Bonaventura dei Lucchesi	-0,11	1	Palazzo Barberini	0,92	3
Chiostro di S. Clemente	-0,84	1	Chiesa di Santa Maria Sopra Minerva	-0,04	1	Basilica Paleocristiana di S. Aurea	0,93	3
Chiostro di Santa Maria Sopra Minerva	-0,82	1	Chiesa di S. Clemente Basilica Superiore	-0,04	1	Chiesa di S. Pudenziana	1,00	3
Museo degli Strumenti Musicali	-0,81	1	Chiesa di S. Bonaventura al Palatino	-0,02	1	Villa Sarvognan di Brazz	1,01	4
Galleria Doria Pamphilj	-0,80	1	Chiesa di S. Stefano del Cacco	0,02	2	Chiesa di Santa Maria in Montesanto	1,24	4
Chiesa di S. Silvestro al Quirinale	-0,80	1	Chiesa di S. Caterina a Magnanapoli	0,04	2	Chiesa di San Crisogono	1,27	4
Museo Nazionale delle Arti e Tradizioni Popolari	-0,79	1	Tempietto di S. Andrea	0,05	2	Chiesa di S. Tommaso in Parione	1,57	5
Chiesa Nostra Signora del Sacro Cuore	-0,73	1	Complesso di S. Ignazio - Chiesa	0,05	2	Chiesa di S. Marco	1,70	5
Chiesa di S. Eligio degli Orefici	-0,66	1	Chiesa di S. Maria Maddalena	0,26	2	Chiesa di S. Cecilia in Trastevere	1,87	5
Oratorio del Gonfalone	-0,65	1	Cappella del Crocifisso	0,29	2	Chiesa di S. Martino ai monti	1,90	5
Chiesa di S. Dorotea	-0,61	1	Chiesa di S. Agata	0,33	2	Chiesa di S. Filippo Neri	2,57	5
Chiesa di S. Bibiana	-0,59	1	Chiesa di S. Stefano Rotondo al Celio	0,40	2			

I beni elencati nella tabella 1 sono stati suddivisi in 5 classi in base alla loro vulnerabilità (tabella 2).

Tabella 2 - Classi di Vulnerabilità

Classe di Vulnerabilità	Vulnerabilità (V)
1	$V \leq 0$
2	$0 < V \leq 0,5$
3	$0,5 < V \leq 1$
4	$1 < V \leq 1,5$
5	$V > 1,5$

Alla classe di vulnerabilità più alta (5) appartengono quei beni caratterizzati da un peggiore stato di conservazione.

Chiesa di Santa Cecilia in Trastevere



Chiesa di San Crisogono



4. IL CALCOLO DELL'EROSIONE SUPERFICIALE

I dati climatici utilizzati per il calcolo dell'erosione sono stati forniti dall'ARPA Lazio mentre i valori delle concentrazioni medie annue degli inquinanti atmosferici sono stati estratti dalla banca dati BRACE³.

Il calcolo dell'erosione si ottiene inserendo nella formula di Kucera (5) le concentrazioni di biossido di zolfo (SO₂), acido nitrico (HNO₃) e particolato atmosferico (PM₁₀).

E' possibile ricavare le concentrazioni di HNO₃ a partire da quelle di NO₂ e O₃ mediante la formula derivata nell'ambito del progetto Multiassess.

$$[\text{HNO}_3] = 516 \cdot e^{-3400/(T+273)} \cdot ([\text{NO}_2] \cdot [\text{O}_3] \cdot \text{Rh})^{0.5} \quad (7)$$

[HNO₃], [NO₂], [O₃] = concentrazioni (in µg/m³) di acido nitrico, biossido di azoto e ozono

T = temperatura (°C)

Rh = umidità relativa (%)

4.1 I dati meteorologici e le concentrazioni degli inquinanti atmosferici

Nella tabella 3 sono riportati i dati delle precipitazioni, della temperatura media annua e dell'umidità relativa media annua misurati a Roma nel 2009.

Tabella 3 - Dati meteorologici a Roma nel 2009

2009	T(°C)	UR(%)	Pioggia (mm)
Francia	16	67	-
L.go Magna Grecia	17	68	-
Saredo	17	63	703
Villa Ada	13	72	731
media	16	68	717

Per il calcolo dell'erosione si considera la media dei valori meteorologici misurati nelle quattro stazioni di Roma.

La tabella 4 mostra invece i dati di concentrazione di biossido di azoto (NO₂), ozono (O₃), biossido di zolfo (SO₂) e particolato atmosferico (PM₁₀) misurati nel 2009 presso le stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria di Roma e raccolte dall'ISPRA nell'ambito delle procedure europee sullo scambio di informazioni⁴.

Tabella 4 - Concentrazioni (µg/m³) degli inquinanti atmosferici misurati a Roma nel 2009

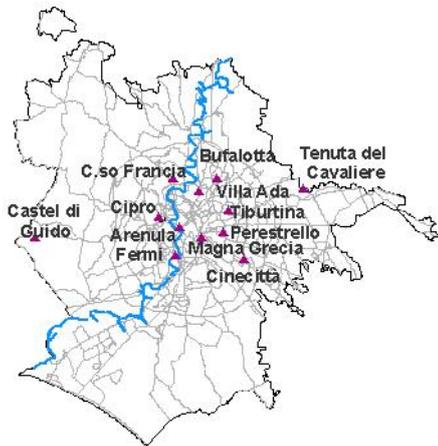
Stazioni	NO ₂ (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Arenula	65	-	-	34
L.go Perestrello	51	43	-	35
Francia	82	25	-	40
L.go Magna Grecia	72	30	-	37
Cinecittà	48	42	-	34
Villa Ada	38	37	1,1	27
Castel di Guido	17	56	-	-
Tenuta del Cavaliere	33	36	-	-
Fermi	78	-	-	39
Bufalotta	48	37	1,3	28
Cipro	54	37	-	31
Tiburtina	70	-	-	38

³ <http://www.brace.sinanet.apat.it/web/struttura.html>

⁴ Exchange of Information on air - EoI; Decisioni 97/101/CE e 2001/752/CE.

La figura 4 mostra la localizzazione delle 12 centraline di monitoraggio della qualità dell'aria presenti a Roma, gestite da ARPA Lazo.

Figura 4 - Localizzazione e classificazione delle centraline di monitoraggio della qualità dell'aria di Roma



Nome Stazione	Tipo Stazione	Tipo Zona
Arenula	Fondo	Urbana
L.go Perestrello	Fondo	Urbana
C.so Francia	Traffico	Urbana
L.go Magna Grecia	Traffico	Urbana
Cinecittà	Fondo	Urbana
Villa Ada	Fondo	Urbana
Castel di Guido	Fondo	Rurale
Tenuta del Cavaliere	Fondo	Suburbana
Fermi	Traffico	Urbana
Bufalotta	Fondo	Urbana
Cipro	Fondo	Urbana
Tiburtina	Traffico	Urbana

Per poter calcolare la potenziale erosione, non solo nell'intorno delle centraline di monitoraggio ma a livello comunale, i dati registrati nelle stazioni possono essere spazializzati su tutto il territorio mediante tecniche di interpolazione geostatistica.

Per effettuare questo tipo di spazializzazione è necessario avere un numero consistente di dati di input. Come si può notare nella tabella 4, soltanto due delle dodici centraline considerate, hanno misurato nel 2009 tutti e quattro gli inquinanti necessari per il calcolo dell'erosione (la centralina a Villa Ada e quella situata presso via della Bufalotta) quindi i dati a disposizione da utilizzare per l'interpolazione non sono sufficienti ad ottenere una spazializzazione statisticamente significativa.

Per poter quindi applicare le tecniche di interpolazione, le serie di dati mancanti o incomplete di alcune stazioni sono state ricostruite attraverso un metodo di stima obiettiva.

4.2 La ricostruzione delle serie di dati mancanti

Come mostrato nella tabella 4, per il 2009, non sono disponibili le concentrazioni medie annuali del PM₁₀ nelle stazioni di Castel di Guido e di Tenuta del Cavaliere, le medie annuali di SO₂ in tutte le centraline (escluse quelle di Villa Ada e Bufalotta), e i livelli di O₃ nelle stazioni di Arenula, Corso Francia, L.go Magna Grecia, Fermi e Tiburtina.

Per ricostruire i dati mancanti di PM₁₀ ed SO₂ è stato utilizzato un modello lineare di stima della variabile dipendente in funzione di una o più variabili indipendenti basato sulla regressione multipla stepwise convenzionale [13].

Nel caso in cui la variabile dipendente era la concentrazione media annuale di PM₁₀, le variabili indipendenti inserite nel modello erano le concentrazioni degli altri inquinanti misurati contemporaneamente nello stesso sito (CO, NO, NO₂, NO_x, SO₂, e O₃).

La base di dati era costituita dall'insieme delle concentrazioni medie annuali rilevate nelle 12 centraline di monitoraggio della qualità dell'aria di Roma, tra il 2003 e il 2008.

Attraverso il metodo di esclusione per passi, il miglior modello è risultato quello in cui l'unico predittore è la concentrazione di NO che spiega l'86% della variabilità del PM₁₀ ($r = 0,929; r^2 = 0,856$). Il modello di regressione è descritto dalla seguente equazione:

$$PM_{10} = 0,309 \cdot NO + 25,332 \quad (8)$$

La verifica dell'affidabilità del modello è stata realizzata stimando la concentrazione media annuale di ciascuna stazione per l'anno di riferimento, eliminando dal modello la concentrazione misurata.

Le medie annuali stimate dal modello mostrano uno scarto massimo rispetto ai valori misurati di 6 µg/m³ e un errore medio del 6%, un risultato che può essere considerato adeguato agli scopi dello studio (tabella 5).

Tabella 5 - Confronto tra i dati di PM₁₀ misurati nel 2009 e stimati con il modello di regressione

Stazione	PM ₁₀ annuo misurato (µg/m ³)	PM ₁₀ annuo stimato (µg/m ³)	NO annuo misurato (µg/m ³)	Differenza tra PM ₁₀ st e PM ₁₀ ^{mis} (µg/m ³)	scarto %
Arenula	35	35	30	0	0%
L.go Perestrello	35	33	26	-2	-6%
C.so Francia	40	45	63	5	13%
L.go Magna Grecia	37	37	37	0	0%
Cinecittà	34	32	23	-2	-6%
Villa Ada	27	29	13	2	7%
Castel di Guido	-	26	3	-	-
Tenuta del Cavaliere	-	30	14	-	-
Fermi	39	41	50	2	5%
Bufalotta	28	31	18	3	11%
Cipro	31	37	38	6	19%
Tiburtina	38	38	40	0	0%
scarto % medio assoluto					6%

Per stimare le concentrazioni mancanti di SO₂ è stato usato lo stesso metodo (in cui naturalmente la variabile dipendente era l'SO₂) partendo dalla stessa base di dati. Anche in questo caso l'unico predittore è risultato l'NO. La variabilità spiegata dal modello era in questo caso del 76% ($r = 0,869; r^2 = 0,736$).

Il modello di regressione è descritto dalla seguente equazione:

$$SO_2 = 0,0531 \cdot NO + 0,495 \quad (9)$$

L'affidabilità del modello è stata verificata per le due stazioni (Villa Ada e Bufalotta) che hanno registrato i livelli di SO₂ nell'anno di riferimento.

Nella tabella 6 sono riportate le concentrazioni di biossido di zolfo stimate con il modello.

Tabella 6 - Confronto tra i dati di SO₂ misurati nel 2009 e stimati con il modello di regressione

Stazione	SO ₂ annuo misurato (µg/m ³)	SO ₂ annuo stimato (µg/m ³)	NO annuo misurato (µg/m ³)	Differenza tra SO ₂ st e SO ₂ ^{mis} (µg/m ³)	scarto %
Arenula	-	2,1	30	-	-
L.go Perestrello	-	1,9	26	-	-
Francia	-	3,8	63	-	-
L.go Magna Grecia	-	2,5	37	-	-
Cinecittà	-	1,7	23	-	-
Ada	1,1	1,2	13	0,1	9%
Castel di Guido	-	0,7	3	-	-
Tenuta del Cavaliere	-	1,2	14	-	-
Fermi	-	3,2	50	-	-
Bufalotta	1,3	1,5	18	0,2	15%
Cipro	-	2,5	38	-	-
Tiburtina	-	2,6	40	-	-

Per quanto riguarda l'ozono, per l'anno di riferimento risultano mancanti le medie annuali presso Corso Francia, Largo Magna Grecia, Fermi, Arenula e Tiburtina.

In questo caso è stato verificato che il miglior predittore delle concentrazioni di ozono in un sito sono le concentrazioni di ozono stesso misurate contemporaneamente in altri siti. I dati presso Corso Francia, Largo Magna Grecia e Fermi sono stati quindi stimati sulla base delle concentrazioni di ozono misurate nella stazione di Tenuta del Cavaliere mediante un modello di regressione lineare semplice.

Le correlazioni tra l'O₃ misurato a Corso Francia, Magna Grecia e Fermi e quello misurato nella centralina di Tenuta del Cavaliere sono descritte dalle seguenti equazioni:

$$O_3 \text{ [C.so Francia]} = 0,724 \cdot O_3 \text{ [Cavaliere]} - 0,791 \quad (10)$$

$$O_3 \text{ [Magna Grecia]} = 0,93 \cdot O_3 \text{ [Cavaliere]} - 3,26 \quad (11)$$

$$O_3 \text{ [Fermi]} = 0,57 \cdot O_3 \text{ [Cavaliere]} + 0,24 \quad (12)$$

I risultati delle stime sono quelli riportati nella tabella 7.

Tabella 7 - Concentrazioni di O₃ stimate con il modello di regressione per le stazioni di Magna Grecia, C.so Francia e Fermi

Stazioni	O ₃ annuo misurato (µg/m ³)	O ₃ annuo stimato (µg/m ³)	Differenza tra O ₃ st e O ₃ ^{mis} (µg/m ³)	scarto %
Arenula	-	-	-	-
L.go Perestrello	43	38	-5	-12%
C.so Francia	-	25	-	-
L.go Magna Grecia	-	30	-	-
Cinecittà	42	42	0	0%
Villa Ada	37	36	-1	-3%
Castel di Guido	56	48	-8	-14%
Tenuta del Cavaliere	36	-	-	-
Fermi	-	21	-	-
Bufalotta	37	33	-4	-11%
Cipro	37	35	-2	-5%
Tiburtina	-	-	-	-

Per le stazioni di Tiburtina e Largo Arenula non sono disponibili i dati di Ozono nel periodo 2003 - 2008; per la ricostruzione è stato quindi utilizzato un modello di regressione lineare basato sulla correlazione tra le concentrazioni medie annuali di O₃ e di NO₂ disponibili nell'arco di tempo considerato.

La correlazione tra i due inquinanti ($r = 0,569$; $r^2 = 0,306$) è descritta dalla seguente equazione:

$$O_3 = - 0,27 \cdot NO_2 + 52,68 \quad (13)$$

I risultati sono riportati nella tabella 8. L'incertezza della ricostruzione è in questo caso maggiore in quanto l'NO₂ spiega solo il 32,3% della variabilità della concentrazione media annuale di ozono.

Tabella 8- Concentrazioni di O₃ stimate per le stazioni di Arenula e Tiburtina

Stazione	O ₃ stimato (µg/m ³)
Tiburtina	34
Arenula	35

Il risultato finale della ricostruzione dei dati mancanti è riportato nella tabella 9.

Tabella 9 - Concentrazioni (µg/m³) degli inquinanti atmosferici misurati e ricostruiti (in rosso) a Roma nel 2009

Stazioni	NO ₂ (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Arenula	65	35	2,1	34
L.go Perestrello	51	43	1,9	35
Francia	82	25	3,8	40
L.go Magna Grecia	72	30	2,5	37
Cinecittà	48	42	1,7	34
Villa Ada	38	37	1,1	27
Castel di Guido	17	56	0,7	26
Tenuta del Cavaliere	33	36	1,2	30
Fermi	78	21	3,2	39
Bufalotta	48	37	1,3	28
Cipro	54	37	2,5	31
Tiburtina	70	34	2,6	38

4.3 Il calcolo dell'erosione nei pressi delle centraline

I dati meteorologici e le concentrazioni degli inquinanti atmosferici, riportati rispettivamente nelle tabelle 3 e 9, sono stati inseriti nell'algoritmo di Kucera (5) per il calcolo della recessione superficiale (espressa in $\mu\text{m}/\text{anno}$) in corrispondenza delle 12 centraline presenti a Roma (tabella 10).

$$R = 4 + 0.0059 \cdot [\text{SO}_2] \cdot \text{Rh}_{60} + 0.054 \cdot \text{Rain} \cdot [\text{H}^+] + 0.078 \cdot [\text{HNO}_3] \cdot \text{Rh}_{60} + 0.0258 \cdot [\text{PM}_{10}] \quad (2)$$

Tabella 10 - Recessione superficiale (R , $\mu\text{m}/\text{anno}$) dei materiali calcarei a Roma nel 2009

Stazione	R($\mu\text{m}/\text{anno}$)
Arenula	6,3
L.go Perestrello	6,2
Francia	6,4
L.go Magna Grecia	6,3
Cinecittà	6,1
Ada	5,8
Guido	5,6
Cavaliere	5,8
Fermi	6,2
Bufalotta	5,9
Cipro	6,1
Tiburtina	6,4

Come già accennato, la recessione superficiale dipende dalle deposizioni di SO_2 , di HNO_3 , di PM_{10} , e delle piogge acide.

Nella tabella 11 sono riportati i contributi percentuali, al fenomeno dell'erosione, delle piogge acide e delle deposizioni di SO_2 , HNO_3 e PM_{10} in corrispondenza di ogni centralina.

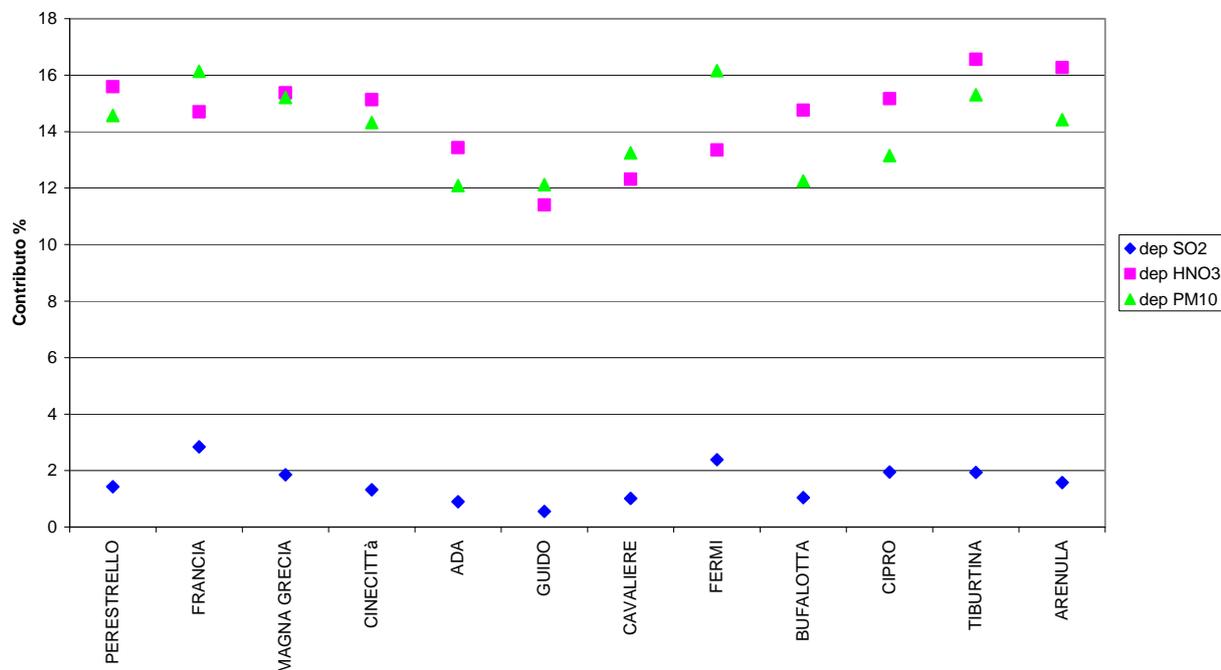
In questo confronto non è stato riportato il contributo del termine che rappresenta il degrado del bene in assenza di inquinanti ($4 \mu\text{m}/\text{anno}$), che, rispetto alle altre componenti considerate, risulta essere quello maggiormente significativo (oltre il 60%).

Tabella 11 - Contributo % delle piogge acide e delle deposizioni degli inquinanti atmosferici

Stazioni	Piogge acide (%)	Dep SO_2 (%)	Dep HNO_3 (%)	Dep PM_{10} (%)
Arenula	4	2	16	14
L.go Perestrello	4	1	16	15
Francia	4	3	15	16
L.go Magna Grecia	4	2	15	15
Cinecittà	4	1	15	14
Ada	4	1	13	12
Guido	4	1	11	12
Cavaliere	4	1	12	13
Fermi	4	2	13	16
Bufalotta	4	1	15	12
Cipro	4	2	15	13
Tiburtina	4	2	17	15

La figura 5 mostra, in corrispondenza di ogni stazione, il contributo percentuale delle sole deposizioni di inquinanti.

Figura 5 - Contributo % delle deposizioni di inquinanti alla recessione superficiale



Poiché per il calcolo dell’erosione, i valori di umidità relativa e di precipitazioni inseriti nell’algoritmo sono la media dei valori meteorologici misurati nelle cinque stazioni di Roma, il contributo percentuale delle piogge acide è lo stesso in tutte le centraline.

Le deposizioni di SO₂ risultano avere, nel processo di degrado, un peso inferiore rispetto alle deposizioni degli altri due inquinanti considerati.

In generale dai risultati ottenuti si può affermare, in prima approssimazione, che l’erosione calcolata nei dodici punti del comune romano, varia da un minimo di 5,6 µm/anno a Castel di Guido (stazione di fondo rurale) ad un massimo di 6,4 µm/anno ottenuto presso le centraline di Francia e Tiburtina (stazioni di traffico urbano).

La recessione superficiale, calcolata presso la stazione di Arenula, che risulta posizionata nei pressi del maggior numero di beni schedati, è pari a 6,3 µm/anno.

L’erosione dei materiali calcarei è un fenomeno in parte inevitabile, che avviene naturalmente nel tempo anche in assenza di specifiche pressioni antropiche; per questo motivo l’International Co-operative Programme on Effects on Materials (UNECE ICP Materials Programme) [14], [15] ha stabilito valori accettabili di erosione (“acceptable deterioration rate”) per alcuni dei materiali costituenti i beni culturali⁵.

Per un materiale calcareo, il valore tollerabile di erosione è di 8 µm/anno.

I dati ottenuti utilizzando i valori misurati e ricostruiti presso le centraline mostrano quindi che, a Roma nel 2009, la recessione superficiale dei materiali calcarei risulterebbe inferiore al limite proposto dall’ICP Materials Programme.

⁵ La definizione della velocità tollerabile di recessione superficiale è stata effettuata sulla base di due componenti: “the tolerable corrosion before action” ricavata dallo stadio di deterioramento del materiale quando il restauro deve ancora cominciare e “the tolerable time between the maintenance” che indica il tempo accettabile tra una manutenzione/restauro e l’altra [15].

4.4 La spazializzazione dei dati di concentrazione degli inquinanti

Per la spazializzazione dei dati riportati in tabella 9, è stata utilizzata la tecnica di interpolazione geostatistica dell'Ordinary Kriging [16].

TECNICHE DI INTERPOLAZIONE GEOSTATISTICA : ORDINARY KRIGING

Il Kriging è un metodo di interpolazione geostatistica che permette di interpolare un valore nello spazio riducendo l'errore quadratico medio.

La base del kriging è il semivariogramma che indica le differenze spaziali e quantitative di tutte le possibili coppie di punti misurati come una funzione della distanza tra i punti stessi [17].

Il semivariogramma è la funzione che interpola la semivarianza dei valori osservati in gruppi di coppie di punti a determinate distanze.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2 \quad (17)$$

La semivarianza è pari a dove $\gamma(h)$ è la semivarianza della variabile Z alla distanza h mentre $N(h)$ rappresenta il numero di coppie di punti nell'intervallo considerato. Il semivariogramma è il grafico della semivarianza.

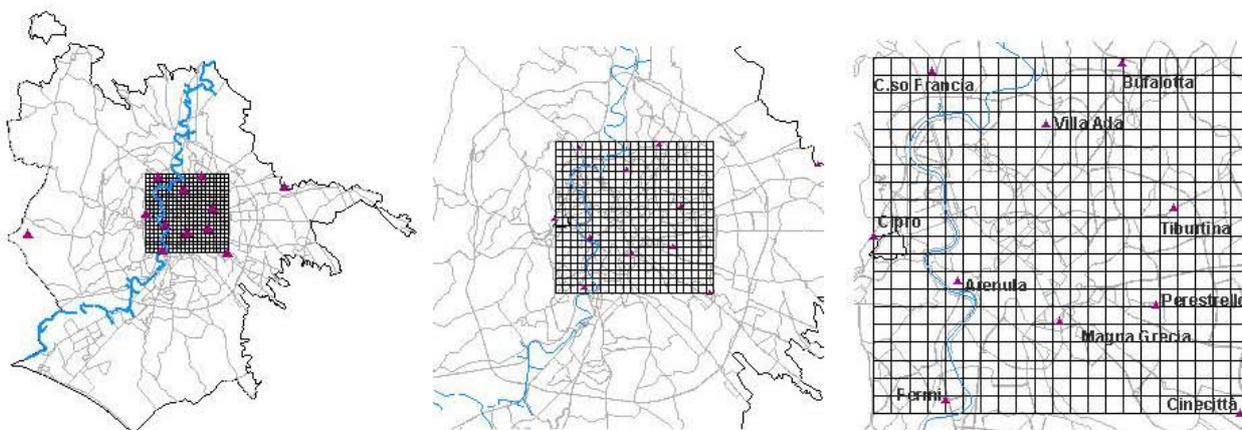
Esistono diversi tipi di kriging tra cui l'Ordinary Kriging e l'Universal Kriging. La differenza principale tra i due metodi consiste nel modo di calcolare la media pesata dei punti campionati: nell'Ordinary Kriging la media è sconosciuta e costante, nell'Universal Kriging la media è sostituita da una funzione di tipo deterministico.

La spazializzazione è stata realizzata considerando una parte del territorio comunale compresa all'interno del Grande Raccordo Anulare (circa 105 km²).

Per la spazializzazione sono stati quindi esclusi i dati di concentrazione di Castel di Guido e di Tenuta del Cavaliere (fig.6) e sono stati utilizzati i valori misurati/ricostruiti nelle altre 10 centraline.

L'area è stata suddivisa in celle di 500 m di lato.

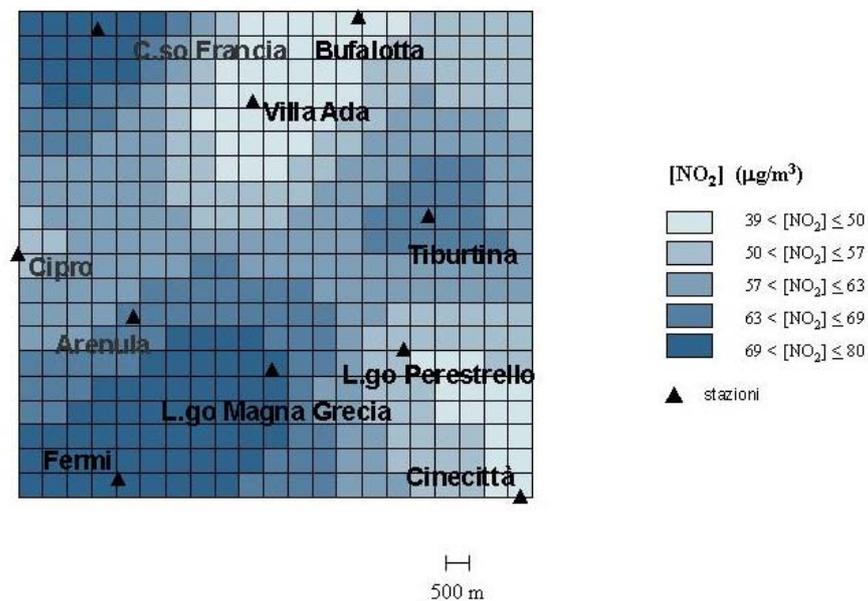
Figura 6 - Area di spazializzazione delle concentrazioni degli inquinanti considerati



4.4.1 Spazializzazione di NO₂

I dati di NO₂ sono stati spazializzati su celle di 500 m di lato (fig. 7). Le concentrazioni calcolate sono comprese tra 39 ÷ 80 µg/m³.

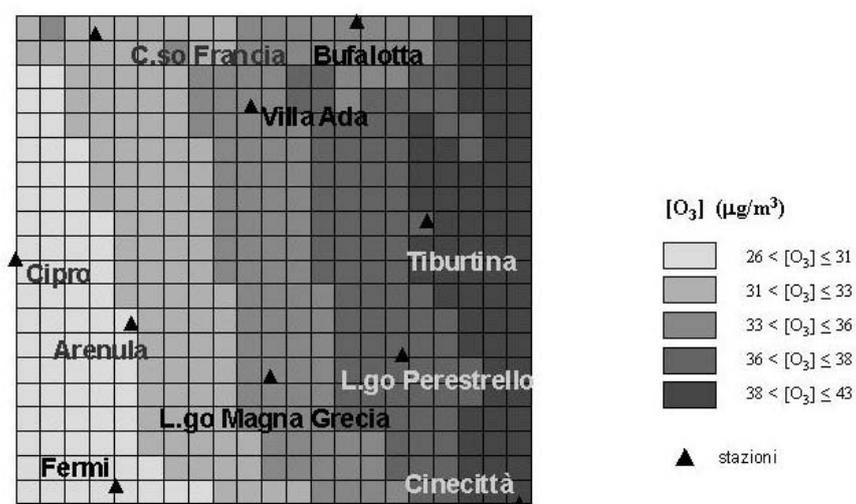
Figura 7 - Spazializzazione di NO₂



4.4.2 Spazializzazione di O₃

I dati di O₃ sono stati spazializzati su celle di 500 m di lato (fig.8). Le concentrazioni calcolate sono comprese tra 26 ÷ 43 µg/m³.

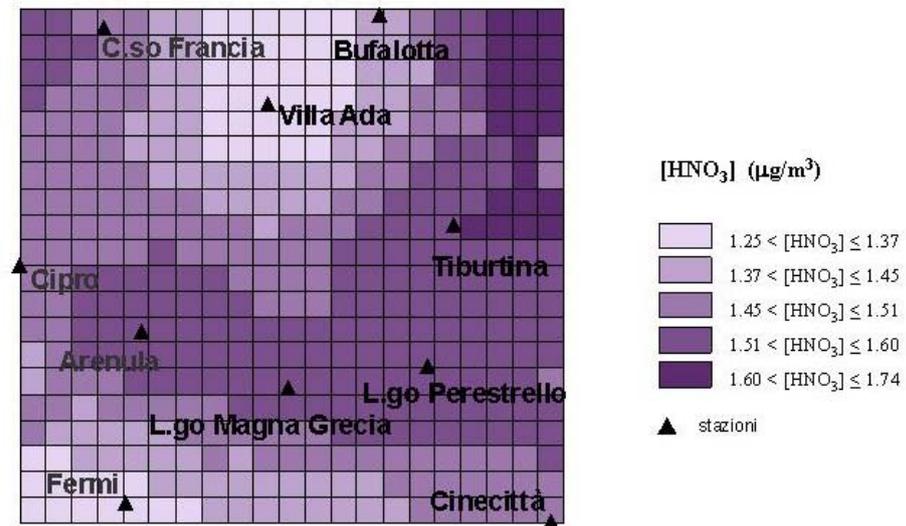
Figura 8 - Spazializzazione di O₃



4.4.3 Spazializzazione di HNO_3

Le concentrazioni di NO_2 e O_3 ricavate per ciascuna cella sono state utilizzate per calcolare le concentrazioni di HNO_3 spazializzate su celle di 500 m di lato (fig.9). Le concentrazioni calcolate sono comprese tra $1.25 \div 1.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

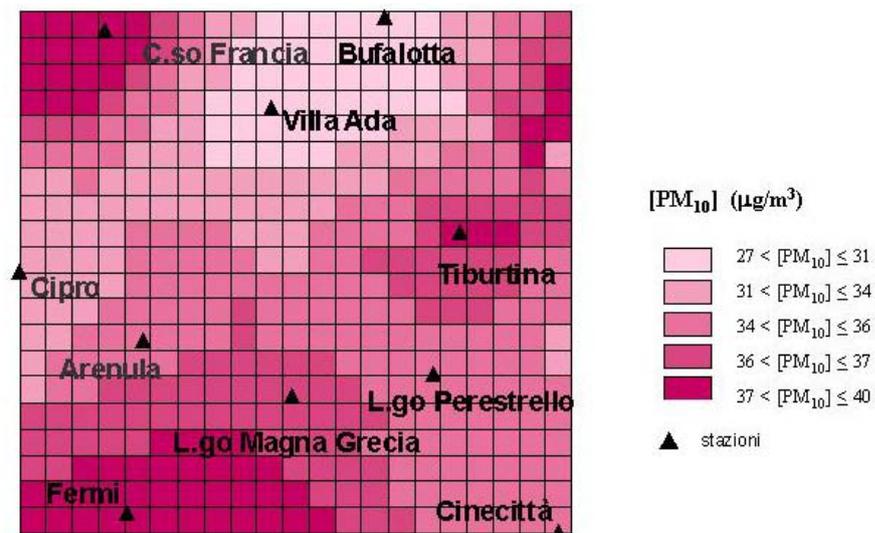
Figura 9 - Spazializzazione di HNO_3



4.4.4 Spazializzazione di PM_{10}

I dati di PM_{10} sono stati spazializzati su celle di 500 m di lato (fig.10). Le concentrazioni calcolate sono comprese tra $27 \div 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

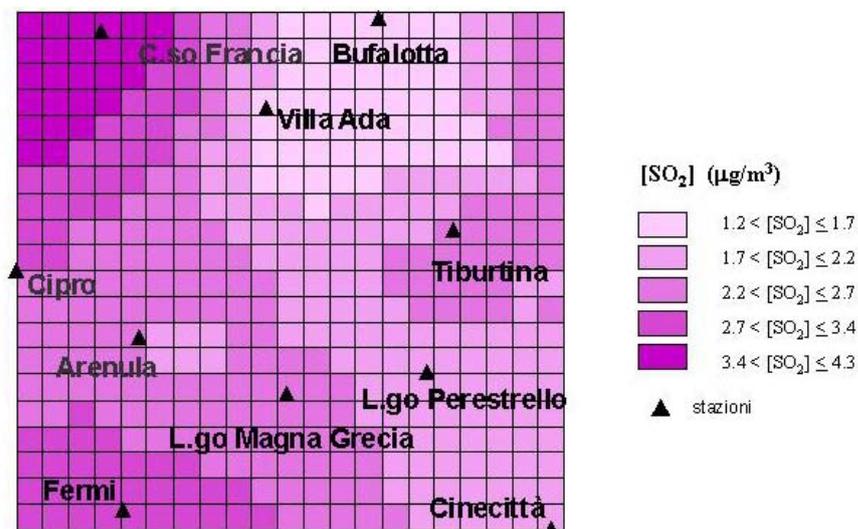
Figura 10 - Spazializzazione di PM_{10}



4.4.5 Spazializzazione di SO₂

I dati di SO₂ sono stati spazializzati su celle di 500 m di lato (fig.11). Le concentrazioni calcolate sono comprese tra $1.2 \div 4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 11 - Spazializzazione di SO₂



4.4.6 Confronto tra i dati misurati e calcolati

Le tabelle successivamente riportate (dalla 12 alla 15) mostrano il confronto tra i valori di concentrazione degli inquinanti (NO₂, O₃, PM₁₀ e SO₂) misurati nelle centraline (o ricostruiti laddove assenti) e le concentrazioni calcolate con la spazializzazione nelle celle in cui sono posizionate le centraline considerate.

Tabella 12 - Concentrazioni di NO₂ misurate nelle centraline e valore ottenuto nella cella corrispondente con il kriging

	[NO ₂] misurata (μg/m ³)	[NO ₂] calcolata (μg/m ³)
Arenula	65	65
L.go Perestrello	51	53
Francia	82	80
L.go Magna Grecia	72	71
Cinecittà	48	49
Villa Ada	38	39
Feronia	78	77
Bufalotta	48	47
Cipro	54	55
Tiburtina	70	69

Tabella 13 - Concentrazioni di O_3 misurate o ricostruite (in rosso) nelle centraline e valore ottenuto nella cella corrispondente con il kriging

	[O_3] misurata/ricostruita ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	[O_3] calcolata ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Arenula	35	35
L.go Perestrello	43	40
Francia	25	29
L.go Magna Grecia	30	33
Cinecittà	42	34
Villa Ada	37	27
Fermi	21	39
Bufalotta	37	28
Cipro	37	32
Tiburtina	34	38

Tabella 14 - Concentrazioni di PM_{10} misurate nelle centraline e valore ottenuto nella cella corrispondente con il kriging

	[PM_{10}] misurata ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	[PM_{10}] calcolata ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Arenula	35	35
L.go Perestrello	35	35
Francia	40	40
L.go Magna Grecia	37	37
Cinecittà	34	34
Villa Ada	27	27
Fermi	39	39
Bufalotta	28	28
Cipro	31	32
Tiburtina	38	38

Tabella 15 - Concentrazioni di SO_2 misurate o ricostruite (in rosso) nelle centraline e valore ottenuto nella cella corrispondente con il kriging

	[SO_2] misurata/ricostruita ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	[SO_2] calcolata ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Arenula	2,1	2,3
L.go Perestrello	1,9	2,0
C.so Francia	3,8	3,9
L.go Magna Grecia	2,5	2,4
Cinecittà	1,7	1,8
Villa Ada	1,1	1,6
Fermi	3,2	3,1
Bufalotta	1,3	1,4
Cipro	2,5	2,6
Tiburtina	2,6	2,3

Il confronto tra il valore misurato/stimato presso la stazione di monitoraggio e quello ottenuto con il kriging nella cella in cui è situata la centralina, può fornire in prima approssimazione, un'indicazione su quanto il valore spazializzato si discosti dal dato di input.

Dalle tabelle (12-15) si può notare che non emergono differenze rilevanti tra le concentrazioni misurate e quella calcolate.

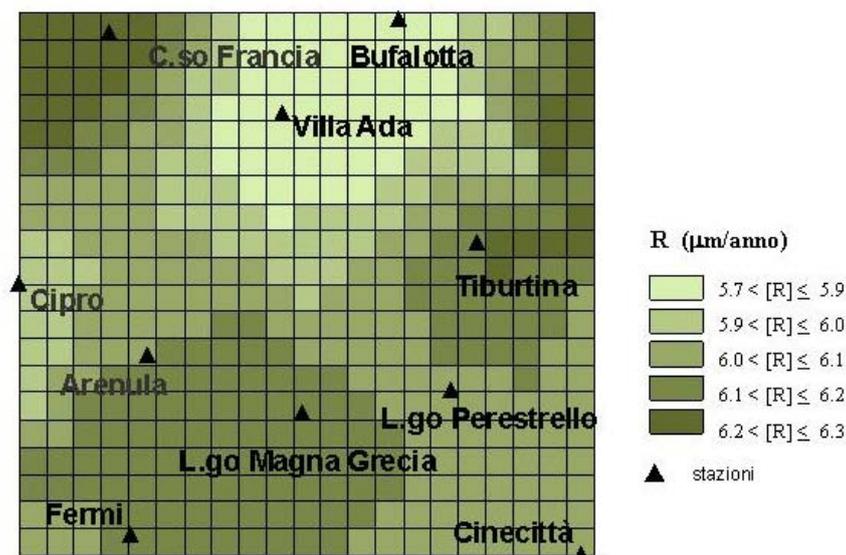
E' importante comunque sottolineare che per avere risultati maggiormente significativi dal punto di vista statistico, l'interpolazione andrebbe realizzata utilizzando un numero maggiore di dati (la spazializzazione in questo studio è stata realizzata utilizzando solo 10 valori di concentrazione).

I risultati ottenuti consentono comunque di ritenere che le concentrazioni spazializzate nell'area considerata si prestino a rappresentare la distribuzione degli inquinanti sul territorio ai fini del calcolo dell'erosione superficiale.

4.5 Il calcolo dell'erosione nell'area delimitata dalle centraline

I dati di concentrazione degli inquinanti ottenuti nei paragrafi precedenti sono stati utilizzati per calcolare la recessione superficiale (fig.12), con la formula di Kucera (5), in ognuna delle celle cui è suddivisa l'area territoriale analizzata.

Figura 12 - Recessione superficiale nell'area delimitata dalle centraline



La tabella 16 riporta il dato calcolato nella centralina (tabella 10) e il dato calcolato nella cella corrispondente.

Tabella 16 - Recessione calcolata nella centralina e il dato calcolato nella cella corrispondente

Stazione	R (μm/anno) centralina	R (μm/anno) cella
Arenula	6,3	6,1
Perestrello	6,2	6,1
Francia	6,4	6,3
Magna Grecia	6,3	6,1
Cinecittà	6,1	6,0
Villa Ada	5,8	5,7
Fermi	6,2	6,1
Bufalotta	5,9	5,7
Cipro	6,1	6,0
Tiburtina	6,4	6,1

La recessione superficiale calcolata nell'area esaminata varia da 5,7 a 6,3 μm/anno.

I valori ottenuti con il kriging sono di poco inferiori a quelli calcolati utilizzando i dati delle centraline. Il calcolo dell'erosione, ottenuta con i dati spazializzati a livello comunale, non mostra significative variazioni rispetto all'erosione calcolata nei pressi della centralina poiché le concentrazioni di inquinanti spazializzate poco si discostano da quelle misurate nelle stazioni di monitoraggio.

Per il calcolo della pericolosità territoriale nei pressi del bene, i dati misurati dalle centraline possono quindi essere ritenuti sufficientemente rappresentativi della qualità dell'aria nell'area circostante il monumento considerato.

L'erosione (locale) nei pressi del bene potrebbe invece essere influenzata dai parametri microclimatici che generalmente sarebbe più opportuno ricavare tramite opportune campagne di monitoraggio in situ.

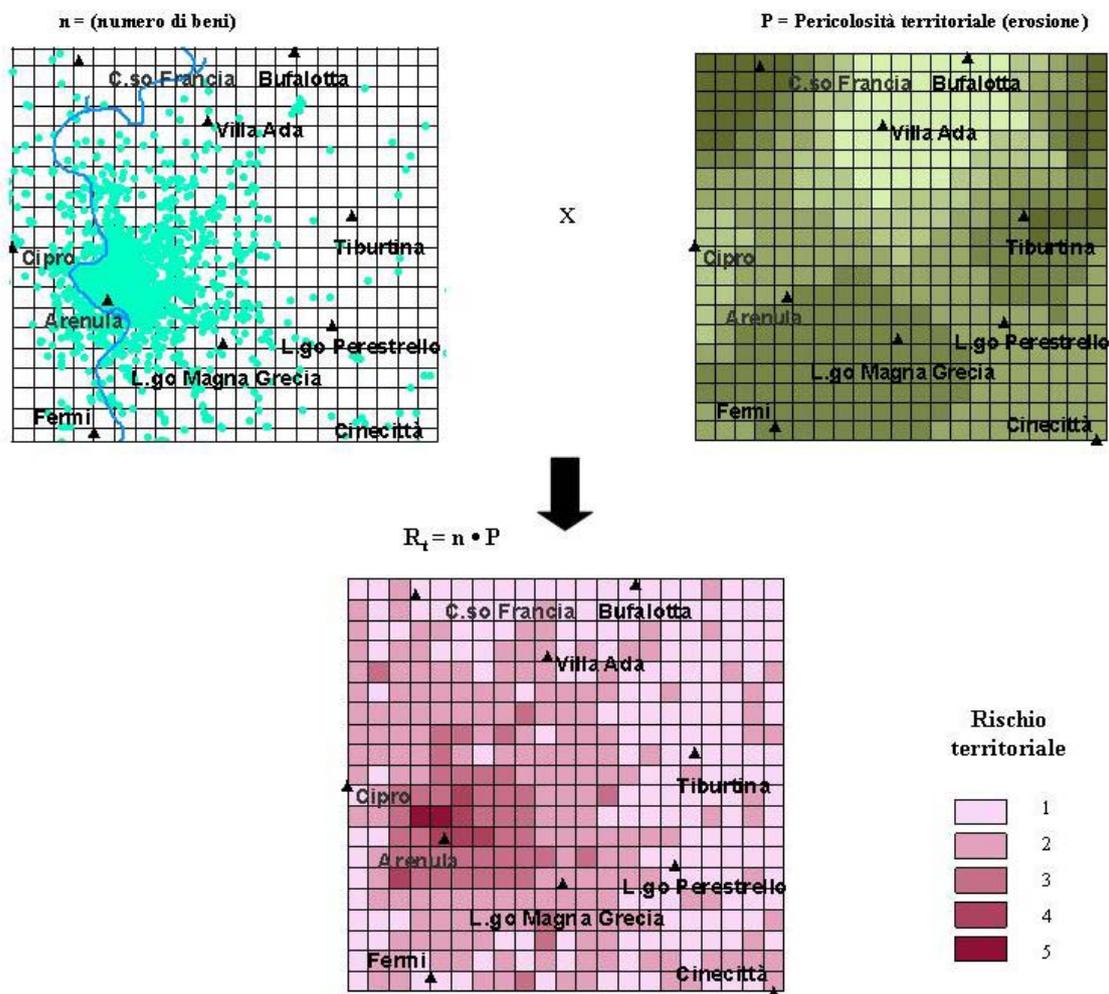
5. IL CALCOLO DEGLI INDICATORI DI RISCHIO

I dati di erosione calcolati con il kriging nell'area all'interno del Grande Raccordo Anulare, sono stati utilizzati per calcolare gli indicatori di rischio territoriale e di rischio individuale.

5.1 Il rischio territoriale

Per il calcolo del rischio territoriale, la mappa di erosione ottenuta nel paragrafo precedente è stata sovrapposta alla mappa di georeferenziazione dei beni culturali elencati nella Carta del Rischio (fig.13). L'indicatore si ottiene moltiplicando il numero di beni (n) presenti in una determinata cella con la pericolosità territoriale (P, rappresentato nel nostro caso specifico dal valore dell'erosione) calcolata nella cella considerata.

Figura 13 - Rischio territoriale



I valori del rischio territoriale ottenuti (espressi in $n \cdot \mu\text{m}/\text{anno}$) sono stati suddivisi in cinque classi (tabella 17).

Tabella 17 - Classi di rischio territoriale

Classe di Rischio	Rischio Territoriale ($n \cdot \mu m/anno$)	Numero dei beni presenti nella celle
1	$R = 0$	$n=0$
2	$0 < R \leq 61$	$0 < n \leq 10$
3	$61 < R \leq 579$	$10 < n \leq 96$
4	$579 < R \leq 948$	$96 < n \leq 156$
5	$948 < R \leq 1299$	$156 < n \leq 215$

Alla classe 1 appartengono le celle nelle quali non è collocato alcun bene e per le quali il rischio territoriale è quindi pari a zero.

La classe 5 corrisponde al rischio più alto e si ottiene nelle griglie contenenti un numero di monumenti compreso tra 156 e 215.

Poiché il rischio territoriale dipende principalmente dalla distribuzione dei beni, come ovvio, le celle situate al centro della città, contenendo un maggior numero di monumenti, risultano essere quelle a rischio di erosione più alto.

5.2 Il rischio individuale

Per il calcolo del rischio individuale sono stati utilizzati i dati di vulnerabilità superficiale dei 77 beni elencati nella tabella 1.

Il rischio individuale è stato calcolato moltiplicando l'erosione ottenuta nella cella in cui è situato il bene, per il dato di vulnerabilità del monumento considerato.

Anche in questo caso i valori ottenuti sono stati suddivisi in 5 classi (fig. 14 e tabella 18): alla classe 1 appartengono i beni per i quali il rischio è più basso; alla classe 5 quelli caratterizzati da un rischio più elevato.

Figura 14 - a) Rischio individuale per i beni di Roma b) Sovrapposizione della mappa di rischio individuale con la mappa di erosione

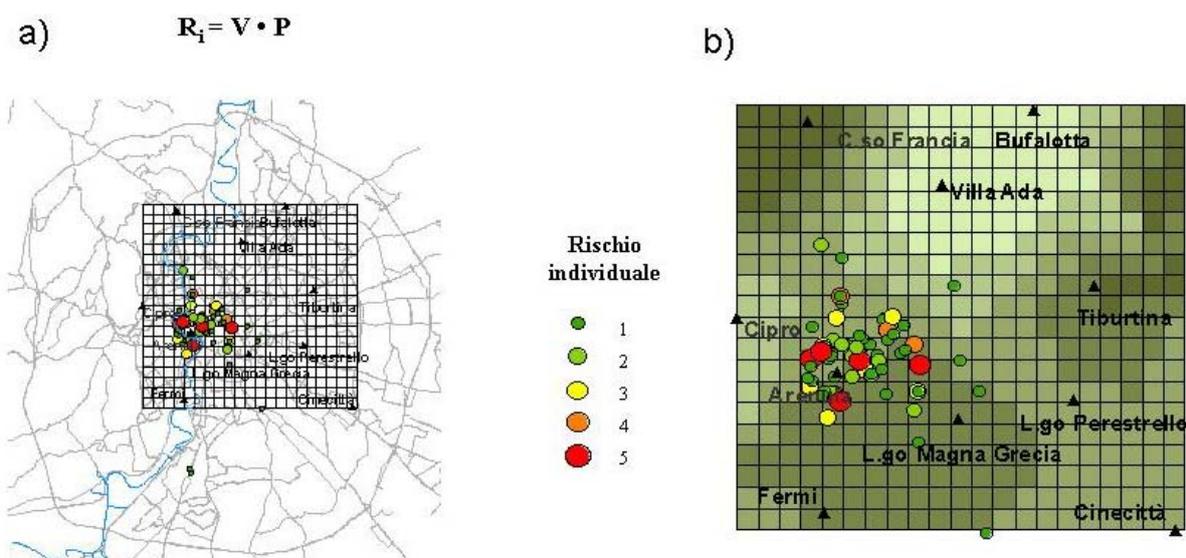


Tabella 18 - Classi di rischio individuale

Classe di Rischio	Rischio Individuale (u.a. • $\mu\text{m}/\text{anno}$)	Vulnerabilità dei beni
R=1	$R \leq 0$	$V < 0$
R=2	$0 < R \leq 2.8$	$0 < V \leq 0.5$
R=3	$2.8 < R \leq 5.6$	$0.5 < V \leq 1$
R=4	$5.6 < R \leq 7.7$	$1 < V \leq 1.5$
R=5	$7.7 < R \leq 15.52$	$V > 1.5$

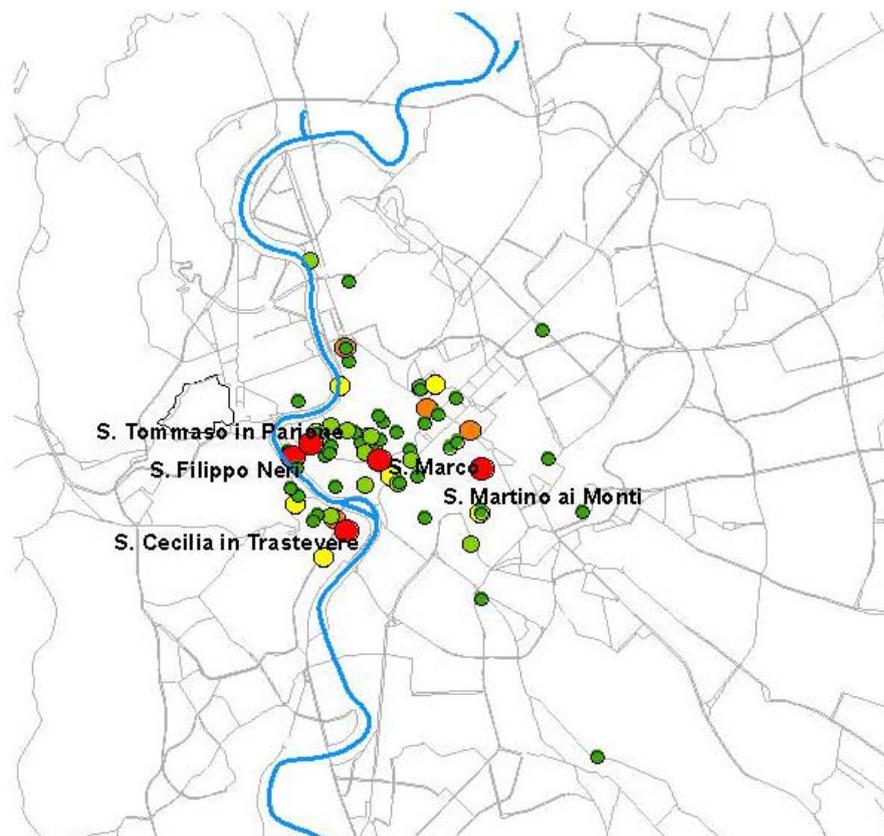
I beni che possiedono una vulnerabilità inferiore a zero sono caratterizzati, dato il modello utilizzato e quindi l'incidenza notevole del valore di vulnerabilità, da un rischio basso e appartengono alla classe 1; i beni con vulnerabilità più alta (superiore a 1.5 u.a.) possiedono il rischio più alto e appartengono alla classe 5. La mappa 14b mostra che i beni, pur essendo collocati in celle caratterizzate da valori di erosione con piccole variazioni (da 6 a 6,2 $\mu\text{m}/\text{anno}$), sono caratterizzati da classi di rischio molto differenziate.

Nelle griglie caratterizzate dalla stessa recessione superficiale, infatti, il rischio individuale dipende principalmente dallo stato di conservazione del bene.

A parità di pericolosità territoriale quindi il rischio è influenzato molto dalla vulnerabilità.

Sulla base dei risultati ottenuti in questo studio sperimentale, i monumenti più a rischio sono le chiese di S. Marco, S. Martino ai Monti, S. Tommaso in Parione, S. Filippo Neri e S. Cecilia in Trastevere, situate nel centro della città nei pressi del fiume Tevere (fig.15), caratterizzati da un peggiore stato di conservazione.

Figura 15 - Localizzazione dei beni risultati a maggiore rischio individuale (in rosso)



CONCLUSIONI

L'erosione per i materiali calcarei è stata calcolata in corrispondenza delle centraline di monitoraggio della qualità dell'aria di Roma e in un'area di circa 105 km² delimitata dalle centraline di monitoraggio della qualità dell'aria.

L'erosione presso le centraline è stata elaborata utilizzando i dati misurati dalle stazioni di monitoraggio e quelli ricostruiti (nei casi in cui le serie risultavano incomplete). I risultati indicano una recessione superficiale compresa tra 5,6 µm/anno (stazione di Castel di Guido) e 6,4 µm/anno (presso Tiburtina e Corso Francia).

L'erosione nell'area delimitata dalle centraline, calcolata utilizzando l'Ordinary Kriging, risulta compresa tra 5,7 ÷ 6,3 µm/anno.

Il valore accettabile di erosione per un materiale calcareo, secondo quanto stabilito dall'ICP Materials Programme, risulta pari a 8 µm/anno; dai dati ricavati nel presente lavoro quindi la recessione superficiale a Roma risulta essere al di sotto dell'“acceptable deterioration rate”.

I valori di erosione ottenuti, correlati con le informazioni relative alla distribuzione e allo stato di conservazione dei beni, hanno consentito l'elaborazione degli indicatori di rischio territoriale e individuale.

Il rischio territoriale risulta, come ovvio, più alto nelle celle situate al centro della città, poiché in esse è situato un maggiore numero di beni.

Per quanto riguarda il rischio individuale, i 77 monumenti considerati tra i 3762 georeferiti, sono collocati in celle caratterizzate da valori di erosione che variano da 6 a 6,2 µm/anno.

Nonostante la potenziale aggressione territoriale, cui sono esposti i beni sul territorio, sia pressoché omogenea, l'impatto che si può stimare sui diversi monumenti si differenzia in modo netto in conseguenza della diversa vulnerabilità degli stessi. Infatti in analogia con quanto accade nel caso di ecosistemi diversi, per i quali la gravità dell'impatto dipende dalla diversa adattabilità dei recettori alle mutazioni indotte dall'inquinamento, nel caso dei monumenti questa viene a dipendere soprattutto dalle loro condizioni di conservazione e quindi in aree caratterizzate dalla stessa erosione (pericolosità territoriale), il rischio individuale dipende principalmente dallo stato di conservazione del bene (vulnerabilità).

Sulla base dei risultati ottenuti in questo studio sperimentale, tra i monumenti schedati, quelli più a rischio sono le chiese di S. Marco, S. Martino ai Monti, S. Tommaso in Parione, S. Filippo Neri e S. Cecilia in Trastevere, situate nel centro della città nei pressi del fiume Tevere.

Il metodo applicato in questo lavoro consente di ottenere informazioni che possono essere utilizzate per individuare i beni caratterizzati da condizioni conservative più critiche e sottoposti ad una maggiore aggressione territoriale al fine di pianificarne la programmazione di eventuali interventi di restauro e manutenzione preventiva.

BIBLIOGRAFIA

- [1] La Cartografia Tematica, 1996, Carta del Rischio del Patrimonio Culturale, Ministero per i Beni Culturali ed Ambientali – Ufficio Centrale per i Beni Archeologici, Architettonici, Storici ed Artistici – Istituto Centrale per il Restauro, Vol.1- A.T.I. Maris
- [2] P. Bonanni, C. Cacace, R. Gaddi, A. Giovagnoli, 2009 *Calcolo del rischio territoriale e del rischio individuale per i beni di interesse storico-artistico a Torino*. Rapporto ISPRA
- [3] *Analisi multi-hazard per la valutazione del rischio locale dei beni culturali*. Atti 12^a Conferenza Nazionale ASITA – l’Aquila 21-24 ottobre 2008
- [4] P. Bonanni, R. Daffinà, R. Gaddi, A. Giovagnoli, V. Silli, M. Cirillo, 2006, *L’impatto dell’inquinamento atmosferico sui beni di interesse storico - artistico esposti all’aperto*, Rapporto APAT.
- [5] A. Bonazza, P. Messina, C. Sabbioni, C. M. Grossi, P. Brimblecombe, 2009, *Mapping the impact of climate change on surface recessions of carbonate buildings in Europe*, Science of the Total Environment 407, 2039 – 2050.
- [6] F.W. Lipfert, 1989, *Atmospheric damage to calcareous stones: comparison and reconciliation of recent experimental findings*. Atmospheric Environment 23(2), 415-129.
- [7] Global Climate change impact on built heritage and cultural landscape, 2007, The Noah’s ark project, Atlas and Guidelines
- [8] *Model for multi-pollutant impact and assessment of threshold levels for cultural heritage (Multiasses)- Report 2005*
- [6] G. Accardo, 1999, *La schedatura conservativa: esperienze dell’ICR in relazione alla Carta del Rischio*, Atti Primo Seminario Nazionale sulla Catalogazione.
- [7] La metodologia per il calcolo del rischio, 1996, Carta del Rischio del Patrimonio Culturale, Ministero per i Beni Culturali ed Ambientali – Ufficio centrale per i beni archeologici, architettonici, storici e artistici - Istituto Centrale per il Restauro, vol.2- A.T.I. Maris.
- [8] Non linear Multivariate Analysis, A. Gifi (1990) New York: John Wiley & Sons, 579 pp, ISBN 0-471-92620-5
- [9] Il Sistema Informativo della Carta del Rischio, 1996, Carta del Rischio del Patrimonio Culturale, Ministero per i Beni Culturali ed Ambientali – Ufficio Centrale per i Beni Archeologici, Architettonici, Storici ed Artistici – Istituto Centrale per il Restauro, Vol.4- A.T.I. Maris
- [13] G. Cattani, A. Di Menno di Bucchianico, D. Dina, M. Inglessis, C. Notaro, G. Settimo, G. Viviano, A. Marconi *Evaluation of the temporal variation of air quality in Rome, Italy from 1999 to 2008*, Ann Ist Super Sanità 2010 | Vol. 46, No. 3: 242-253
- [14] <http://www.corr-institute.se/ICP-Materials/web/page.aspx?refid=12>
- [15] D. de la Fuente, J.M. Vega, F. Vieji, I. Diaz, M. Morcillo, *City scale assessment model for air pollution effects on the cultural heritage*, Atmospheric Environment 45 (2011), 1242-1250
- [16] B. Denby, J. Horàlek, S. E. Walker, K. Eben, J. Fiala, *Interpolation and assimilation methods for European scale air quality assessment and mapping*, Part I Review and recommendations, ETC/ACC Technical Paper 2005/7, 2005
- [17] R. Beelen, G. Hoek, E. Pebesma, D. Vienneau, Kees de Hoogh, D. J. Briggs, *Mapping of background air pollution at a fine spatial scale across the European Union*, Science of the Total Environment 407 (2009) 1852 – 1867.