Integrated Evaluation Methods to HBIM for the Management of Cultural Heritage: the case study of the Colonnade of Patio de los Leones, Alhambra-Granada

G. Acampa*, M. Grasso**

keywords: historical heritage evaluation, safeguard, vulnerability index, HBIM, AHP

Abstract

Historical heritage plays a fundamental role in society. One of the primary targets for European countries is to ensure its safeguarding so that it can be enjoyed by future generations. This paper defines a procedure for the safeguarding of cultural heritage which is often in an advanced state of degradation and threatened by climate change and the increasing number of tourists. The methodology consists of three basic steps: the identification of the technical elements on which intervention is necessary, the assessment of the vulnerability level of these elements considering

exogenous factors and the hierarchization of the most vulnerable elements through the application of the Analytic Hierarchy Process. The case study is the “Patio de los Leones” a world-famous site within the Alhambra and Generalife which every year attracts over 2 million tourists to Granada, Spain. The aim is to set priorities for intervention on the 124 “Macaël” marble columns according to the need for restoration.

The validation of the methodology and management of the data to achieve the hierarchy among the columns was done using an HBIM model.

1. INTRODUCTION

The objective of this study¹ is to define a procedure useful for the evaluation of intervention priorities in contexts where the historical-artistic heritage is characterised by a high number of recurrent technical elements. The procedure is designed to help organisations managing such sites optimise maintenance schedules². Specific focus will be on the colonnade of the Patios de los Leones, the heart of the world-famous site of the Alhambra and the Generalife, which attracts more than 2 million tourists every year to Granada, Spain.

The study was divided into several phases: the first one concerned the study of the state of the art with respect to two themes:

- a) the definition of historical heritage in the reference regulations;
- b) the identification of the main methods for the evaluation and safeguard of historical heritage. The second phase focused on the choice of the field of investigation³. Following several meetings with the Director of the Conservation Service of the Patronage of Alhambra and Generalife⁴ it became clear the need to identify a methodology ensuring the safeguard of *Patio de los Leones* columns⁵.

¹ The present article is the synthesis of the Doctoral Thesis carried out within the framework of the Doctoral Course in Civil Infrastructures for the Territory XXXIII Cycle at the Kore University of Enna, entitled "HBIM Integrated Evaluation Methods for the Management of Historical Heritage: the case of the Colonnade of the *Patio de los Leones*, Alhambra-Granada" discussed by Arch. Mariolina Grasso, Tutor Prof. Giovanna Acampa.

² This need arose during the scientific research activity conducted within the European project WARMEST (*IoT Altitude Remote sensing for the Monitoring of the state of cultural heritage Sites: building an integrated model for maintenance*) 2[1], focused on *heritage management*. The WARMEST project has been funded with European funds H2020- Marie Skłodowska-Curie Actions-RISE- 2017. The strategic objective of the project is to create a *Decision Support System* to perform a risk analysis of historical heritage. Participating in the international multi-sectoral consortium are 30 researchers belonging to:

– 3 academic institutions: University of Granada (Spain) - Kore University of Enna (Italy) - Industrial System Institute, Athens (Greece);

– 4 private companies: CTAdventure, Gdansk (Poland) - Enginlife, Milan (Italy) - ITEM Media, Granada (Spain) - Zenon, Milan and Florence (Italy); 1 association: ARTES (Spain).

³ The survey area was chosen from among the pilot sites of the WARMEST project, i.e. the *Patio del Los Leones* which is part of the monumental complex of the Alhambra and Generalife (Granada, Spain), the underwater site of the Colonne known as Marzamemi 1 (Sicily, Italy) and the second Brunelleschi Cloister of the Basilica di Santa Croce (Florence, Italy).

⁴ Managing body of the *Patio de los Leones*.

⁵ 124 columns.

This methodology must consider the different vulnerability of each column to endogenous and exogenous factors such as its exposure to the sun.

The analysis of the investigation field was the focus of the third phase of the study in which the main techniques and tools for surveying the historical heritage were analysed. This, in order to choose the most suitable ones for the peculiarities of the case study. Therefore it was described the survey process *in situ* led to the conservation status of the columns.

The fourth phase of the study dealt with the definition of an assessment procedure to establish the actions required to optimise the restoration work schedule.

This procedure is based on:

- 1) the identification of the level of alteration of the columns (LoA);
- 2) the calculation of a vulnerability index (Iv) for each column according to the exogenous and endogenous factors responsible for decay;
- 3) depending on the value of the vulnerability index obtained the application of multi-criteria analysis and in particular the Analytic Hierarchy Process to obtain the priority of restoration work among the columns.

In addition, an HBIM model⁶ was used to manage all the data collected.

Finally, the fifth and final phase focused on applying the evaluation procedure to the case study and analysing the results obtained.

The study was carried out within an interdisciplinary context in order to achieve the objective and define a method and reliable results from a scientific point of view. Indeed it was necessary to interface and collaborate with various figures, in particular with expert restorers and experts in the object under examination⁷.

In this respect, both in the Italian and international panorama several researchers recognise that multi-criteria evaluation methodologies are fundamental for comparing different alternatives.

⁶ H-BIM (*Heritage or Historic Building Information Modeling*) was first used by Murphy et al. [2] of the Dublin Institute of Technology. According to Murphy, H-BIM pursues the modelling and documentation of architectural elements, according to artistic, historical and constructional typologies. Furthermore, H-BIM is considered as a special library of parametric BIM objects designed specifically to support the preservation and management of historical heritage.

⁷ In this sense, it should be noted that the research phase was supported by the collaboration of Prof. Anna Arizzi of the Department of Petrology and Mineralogy of the University of Granada, who is an expert on the material (Macael Marble) that makes up the columns of the *Patio de los Leones*.

In 1992 Girard [3] stated that “the perception of the quality of a cultural architectural resource is by its very nature multidimensional, because it refers to the configuration, [...] to its complexity to its uniqueness etc.”.

As pointed out by Ivanitskaya et al. [4], the discipline of estimation and valuation is frequently combined and integrated with other technical subjects.

Mondini [5] stresses the importance of integration between different disciplines in order to support and facilitate the evaluator in the process of decision making with particular reference to the sustainable transformation of the territory. Also, Copiello et al. [6], highlight the tight integration of Appraisal and Evaluation with related technical disciplines, especially considering the current transition towards highly sustainable and efficient buildings. In 2018, on the conference “Appraisal: contemporary issues 4.0”, organised by SIEV (Società Italiana di Estimo e Valutazione), Stanghellini focused on the identity and in general on the transversality that characterises Appraisal discipline.

Regarding historical heritage, decisions to be taken regarding its preservation are based on a number of multiple and heterogeneous, often conflicting criteria, as well as on the preferences of various stakeholders. In this context, multi-criteria approaches provide an adequate theoretical and methodological framework to address the complexity of valorisation and preservation strategies.

1.1 Description of the case study

The *Patio de los Leones* is part of the monumental complex of the *Alhambra* and *Generalife*, in Granada. It is located within *Nazaries* Palace built during the reign of Muhammad V (1354-59 and 1362-91) and considered the most important manifestation of Granada's *Nazari* art, both as a culmination of the style previously in use and for the innovations it introduced.

The *Patio* has a rectangular floor plan measuring 28.5 x 15.7 m, with galleries on all sides supported by 124 columns of *Macael* marble. Some of these are single, others double or in groups of three or four in the corners. In the centre of each of the 2 shorter sides is a small square temple also supported by the columns. In the centre of the courtyard is the famous fountain with a dodecagonal plan supported by twelve lions, whose archaic appearance has led to many hypotheses about its origin. The *Patio* is accessed from the west gallery, passing through the *Sala de los Mocarabes*. In the middle of each of the other three galleries are the *Sala de dos Hermanas* (north gallery), the *Sala de dos Reyes* (east gallery) and

the *Sala de Abencerrajes* (south gallery). The columns supporting the galleries have a diameter of about 22 cm and are about 2.2 m high (from the base to the capital). On the upper part of the shaft (upper third) are several graft rings at the double capital, cylindrical at the base and cubic at the upper end. Thick white marble abacuses are placed on the capitals to support the brick pillars on which the wooden beams that form the horizontal architraves rest. The decorations in plaster, plaster and *muqarnas* help to eliminate any appearance of structural heaviness, giving great lightness to the whole.

2. STATE OF THE ART

2.1 Definitions of historical heritage, its safeguarding and the main reference regulations

To propose an unambiguous and objective definition of the concept of heritage the main charters and guidelines that can be universally applied have been studied. Apart from the Athens Charter (1931) which considers the conservation of artistic and archaeological heritage without defining it⁸, the first text to provide a definition of the concept of heritage is the International Charter of Venice (1964). Within the introduction is given the first definition of heritage: “The monumental works of peoples, bearing a spiritual message from the past, represent, in the present life, the living testimony of their secular traditions. Humanity, which every day takes note of human values, considers them as common heritage, recognising itself responsible for their preservation before future generations”. As pointed out by Buonincontri et al. [6] the documents following the Venice Charter focus on two different issues: the definition of general principles for the identification of new fields of conservation and the attempt to integrate the principles of safeguarding with systems of territorial control and economic and social development.

In 1975, the Committee of Ministers of the Council of Europe promulgated the Amsterdam Charter - European Charter of Architectural Heritage, in which the unique architecture of Europe was recognised as the common heritage of all its peoples

⁸ It talks mainly about the preservation of artistic and archaeological heritage and then about historical monuments, works of art, but without delving into the concept of heritage. This normative approach in defining historic heritage can also be seen in another international document: the European Charter for Architectural Heritage of Amsterdam (1975). These definitions of a normative nature can be found in more detail in the Granada Convention for the Protection of the Architectural Heritage of Europe (1985).

[and the intention of the member states to cooperate with each other in order to protect it was affirmed.

The Krakow Charter in 2000 explicitly states that it refers to the principles expressed in the Venice Charter, but introduces the concept of heritage and no longer of an architectural monument. Therefore, restoration principles do not only apply to the most important buildings but to the entire historic centres.

The Krakow Charter also aims to raise awareness of the preservation and maintenance of the entire territory, including unbuilt landscape areas, as it contains very significant elements of human history and culture.

In Italy more recently, on 23 September 2020, the Chamber of Deputies definitively ratified the "Council of Europe Framework Convention on the Value Historic Heritage for Society", issued in Faro (Portugal) on 27 October 2005.

The Convention, which has so far been ratified by 19 member states of the Council of Europe, is based on the assumption that knowledge and use of cultural heritage are fully human rights, in particular the right of the individual to participate freely in the cultural life of the community and to enjoy the arts, as set out in the 1948 Universal Declaration of Human Rights and the 1966 International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights.

Specifically, the Faro Convention intends to promote a broader understanding of historical heritage and its relationship with the communities that produced and hosted it, recognising the "historical heritage" as the set of resources inherited from the past, reflecting values and beliefs, and the "heritage community" as the set of people who value that heritage. The text, which complements the existing international instruments on the subject, defines the general objectives and suggests possibilities for action by the signatory states, in particular with regard to the promotion of a participatory process for the enhancement of historical heritage. The Convention does not impose specific obligations of action on the signatory states, leaving them free to decide on the most appropriate means of implementing the measures it provides for.

Essentially, the Convention emphasises the value and potential of historical heritage as a resource for sustainable development and quality of life and identifies the "right to historical heritage", recognising individual and collective responsibility for it and emphasising the importance of its preservation and its role in building a peaceful and democratic society.

The Convention thus defines the rights and responsibilities regarding historical heritage and commits the signatories to recognise its public interest, to enhance its value, to enact relevant

legislation and to encourage participation in heritage-related activities.

Having analysed the main conventions at the international level useful for the definition of material and immaterial historical heritage it is appropriate to deepen the reference legal context and the main definitions of historical heritage in Italy and Spain. Looking at Italy it is certain that it is a nation characterised by several "traditions" which affect the whole territory from North to South, and which cannot be neglected, but rather, as stated at the international and European level, must be "safeguarded".

This concept emerged quite early, even before the creation of the Ministry of Cultural and Environmental Heritage (Mibac). The obligatory reference is to the document produced at the end of its work, in 1966, by the Parliamentary Commission (established by Law 26 April 1964, no. 310) chaired by Francesco Franceschini, which defined cultural heritage as "*all that which constitutes material testimony having the value of civilisation*" [7].

However, more recently and with the entry into force in 2004 of the Code of Cultural Heritage and Landscape, the choice has been to restrict the discipline of safeguarding historical heritage to the context of tangible cultural assets only. Article 2, paragraph 2 of the Code states that "*cultural assets are immovable and movable things that are of artistic, historical, archaeological, ethno-anthropological, archival and bibliographic interest, and other things identified by law or on the basis of the law as evidence of the value of civilisation*" [8].

The question arises whether the exclusion of intangible cultural heritage from the Code should imply the disavowal of the existence of such a category [9]. [9] In fact, a quick analysis of the national regulations of the sector or of the regional laws, or even of the municipal regulations on historical heritage, is sufficient to confirm that intangible cultural assets are considered and recognised. By way of example, it is worth recalling the recent law no. 44 of 8 March 2017 [10], which extends to Italian elements included in the Representative List of the Intangible Cultural Heritage of UNESCO, the safeguard measures that law no. 77 of 2006 had adopted only for UNESCO heritage sites and tangible assets [11].

⁹ Law No. 77 of 2006 "Special measures for the protection and enjoyment of Italian sites of cultural, landscape and environmental interest, included in the World Heritage List, placed under UNESCO protection", had its title changed by art.1, c.1, lett. o), Law No. 44 of 2017 to "Special measures for the protection and enjoyment of Italian sites and elements of cultural, landscape and environmental interest, included in the World Heritage List, placed under UNESCO protection".

Finally, the protection of this kind of cultural heritage has also been recognised in the varied system of local autonomies, since their multiplicity means that the identification and related enhancement measures must “naturally” be the responsibility of the community whose values and identity they represent.

Unlike the Italian legal system, the Spanish one stands out for having adopted legislation on intangible historical heritage well before the 2003 UNESCO Convention. In fact, references in this sense, albeit barely hinted at, can already be found in the *Real Decretoley de 9 de agosto de 1926, sobre protección, conservación y acrecentamiento de la riqueza artística*, which contemplated the value of the “típico” and the “pintoresco”. However, it is the Spanish Constitution of 1978 that endowed the intangible historical heritage with an explicit and fundamental legal anchorage “*pioneers en el contexto Constitucional Europeo*”, laying the foundations for the main legislative reference that started the protection of intangible cultural heritage in the Spanish legal system: the *Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español*.

The decision was made to free historical heritage from the concept of materiality, linking it to the importance of its enjoyment by present and future generations and its fundamental social role. The subdivision between assets of cultural interest, assets included in the general inventory of movable property and assets over 100 years old, drawn up by the Spanish Ministry of Culture, identifies the first category as the most important, including those assets for which all decisions are left to the autonomous communities. The exportation of this type of heritage is extremely bound to the definition of specific purposes and for a limited time. As far as private property is concerned, Spanish legislation provides for the duty of conservation and custody, the use of the property in respect of the social and cultural value inherent in the object itself, and the right of pre-emption by the State in the event of any decision to transfer the property. Therefore, according to Fantini [12], the Spanish legal system, although today it can be taken as a reference model of organic legislation on intangible historical heritage, nevertheless, is characterized by a “centralist” interpretation of the UNESCO Convention, in contravention of that *conditio sine qua non* that provides for the qualification of this kind of historical heritage the coexistence of three requirements: intangibility; preferability “community” participation.

2.2 Main methods to evaluate and safeguarding historical heritage

Once defined the meaning of historical heritage it is important to understand how it is evaluated and safeguarded. For this purpose the main scientific publications on the subject were analysed¹⁰.

Considering decision-making process, multi-criteria analyses have become a widespread tool for dealing with problems involving more than one objective. The possibility of considering different types of data (quantitative and qualitative) allows to assign different weights to the identified criteria, manages conflicts between objectives and deduce priorities between alternatives.

In the last decades scientific research has proposed several methods and techniques to perform multi-criteria analyses. Some of the most important ones are *Weighted Sum Model (WSM)* [13], *Weighted Product Model (WPM)* [14], *Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS)* [15], *Analytical Hierarchy Process (AHP)* [16], *ELimination Et Choix TRaduisant la REalité (ELECTRE)* [17], *Technique for Order of Preference By Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)* [18], *Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE)* [19], *Complex Proportional Assessment (COPRAS)* [56], *Visekriterijumska Optimizacija I compromise Resenje (VIKOR)* [20], *Multiobjective Optimization by Ratio Analysis plus Full Multiplicative Form (MULTIMOORA)* [21] and *Additive Ratio Assessment (ARAS)* [15].

Also, in the field of heritage evaluation wide use of multi-criteria analysis has emerged.

The *Analytic Hierarchy Process (AHP)* is applied by Ribera et al. [22], Haroun et al. [23] to identify the *Highest and Best Use* for historical heritage considering both its social, cultural and economic identity and the preservation of its integrity and original image.

Forte F. et al. [24], starting from the analysis of the relationships between conservation and transformation of the historical architectural asset, proposes a model based on multicriteria analysis. Also in this case the AHP is applied for the evaluation of the “vocational” nature of the “Villa Vesuviana” property aimed at its conservative reuse.

AHP is also used in conjunction with other methodologies such as *Additive Ratio Assessment* by Wang et al. [25]. The aim is to determine the priority of preservation among different buildings belonging to the historical heritage.

¹⁰ Publications were analysed using the Scopus bibliographic search engine.

[Della Spina [26] proposes an assessment model based on the combined use of three multi-criteria analyses (*AHP-MacBeth-EVAMIX*) to rank adaptive reuse strategies of unused cultural heritage assets and support decision makers in implementing development strategies in vulnerable contexts.

Appiotti et al [27], suggest a model that includes specific assessment tools based on parameters and indicators related to hazard and vulnerability factors for different types of risks. Multidimensional sets of indicators are used to obtain synthetic indices through a multicriteria approach. The evaluation is then supported by questionnaires to weigh the indicators and at the same time including the opinion of different experts and stakeholders in the assessment model.

Oppio et al. [28] apply *Spatial Multicriteria Analysis (SMCA)* to provide support in all phases of the decision-making process related to the conservation of historical heritage.

The study focused on the first phase of the process (*intelligence*) aiming at defining a multidimensional analytical framework.

Thus, to mapping the diffuse historical heritage with particular attention to its territorial characteristics.

Bottero et al. [29] propose a multi-criteria approach to rank adaptive reuse strategies of historical heritage. They present an application of the *Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE)* to support the design and implementation of adaptive reuse strategies of abandoned historical industrial heritage in vulnerable contexts and evaluate the related tangible and intangible effects.

Focusing again on the identification of the Highest Best Use of historical heritage, Ferretti et al. [30] apply Multi-Attribute Value Theory (MAVT) a particular multi-criteria approach. MAVT can be used to address problems involving a finite and discrete set of alternative actions that need to be evaluated on the basis of conflicting objectives.

Considering the evaluation of the social value of the historical heritage, Torrieri et al. [31] proposed the application of *community mapping* which is a narrative device of the connections between places and people through a language clear to everyone: drawing. It is a special form of representation based on a participatory process which involves the inhabitants of a given identity in an exercise of self-representation and recognition of local value. When it comes to verifying the feasibility of an intervention concerning the historical heritage and in particular the recovery of archaeological sites, Campo et al. [32] propose the application of the *Weithed Sum Model* which belongs to the so-called multicriteria

“outranking” methods (together with ELECTRE, EVAMIX, TOPSIS). Using the “preference synthesising relational system”, it classifies alternatives through the construction of binary relationships between them.

By Salvo et. al. [33], two of the characteristic methods of *Real Estate Evaluation*, i.e. the *market approach* and the *cost approach*, have been applied to determine the market value of historic assets.

Forte et al. [34], considering the *cultural heritage* field, highlight its the characteristics and the different values. Moreover, they define in a systematic way the damage caused by seismic events and suggest the main methods for its evaluation.

By the analysis of the main scientific literature regarding the applications of multi-criteria analysis to decision-making problems concerning cultural heritage, it emerges the importance of the use of combined methodologies which are particularly useful to deal with complex situations [35].

Depending on the method and procedure adopted to reveal the preference of the decision-maker multi-criteria analyses can be classified as follows:

- *O outranking* methods: these employ a procedure based on the construction of binary relationships (mostly discordance and concordance) between pairs of elements. The best known of these are the ELECTRE and PROMETHEE methods.
- Full aggregation methods: Each criterion is assigned a weight. Then, a numerical score is calculated for each alternative and the one with the highest score prevails (e.g. AHP).
- Target, aspiration or reference level methods: these methods identify how far each alternative is from the ideal target or aspiration (e.g. TOPSIS). As already explained, there are many different techniques for multi-criteria analysis and the choice of which method to adopt is never trivial. The following passages propose a focus on some specific techniques that, based on the literature review, have been found to be particularly effective in the context of heritage evaluation¹¹. This is done to identify the analysis that might be most appropriate for solving the decision-making problem at hand.

The study starts with *outranking methods* and in particular ELECTRE methods¹². (*Elimination Et Choix Tradusiant la Réalité*) which consist of the so-called outranking relation.

¹¹ Following the results of the literature survey carried out previously, the main methods recurrently used are AHP, TOPSIS, ELECTRE and PROMETHEE.

¹² The ELECTRE family of methods includes ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE IV, ELECTRE TRI, ELECTRE IS.

The two main procedures characterising ELECTRE are

- a) a multi-criteria aggregation procedure that constructs one or more *outranking* relationships in order to compare each pair of alternatives in a complete way;
- b) an *exploitation* procedure that can provide results depending on how the problem is approached, by choosing, classifying or ordering.

ELECTRE methods make it possible to avoid compensation between criteria and any normalisation process, which distorts the original data. The disadvantage is that they require various technical parameters, which are not always easy to read.

Also in the field of *outranking* methods is PROMETHEE “*Preference Ranking Organization METHods for Enrichment Evaluations*,” which is based on pairwise comparisons between alternatives, where the *decision-makers* preference is defined as a function of the distance between two hypothetical alternatives, for each individual criterion.

The PROMETHEE method makes it possible to operate directly on the variables included in the decision matrix without requiring any normalisation and is applicable even when there is insufficient information. However, when there are numerous criteria involved, method development becomes complex, making it difficult for decision-makers to get a clear picture of the problem.

Regarding the “*Technique for Order Preferences by Similarity to an Ideal Solution*”, (TOPSIS), the idea behind this method is to choose, as the best alternative, the one that is closest to the optimal solution and furthest away from the worst solution. Each alternative is represented by a vector, the elements of which describe the performance of the alternative for each decision criterion.

Therefore, the best solution is one that maximises performance for criteria associated with a benefit (*output*) and minimises performance for criteria associated with a cost (*input*). The advantage of this method is that it requires only a few inputs from the decision-maker and its output is easy to understand. However, in the case of multidimensional problems, it is necessary to resort to vector normalisation, making the decision-making process particularly complex.

To conclude the study, the main aspects that led to the use of the *Analytic Hierarchy Process (AHP)* for the development of the case study are highlighted below.

The AHP outlines a procedure for breaking down problems that can be represented hierarchically. By making explicit all the values involved, the method

allows a more complete knowledge of the decision problem to be solved; it also allows the participation of the different actors involved and the mediation of possible conflicts.

A further feature of this evaluation system is a) the possibility for decision-makers to legitimise the choice, thanks to the *consistency index* check and b) the simplicity with which the decision problem is set up.

This latter aspect is not negligible, given the complex administrative structure that characterised the reference context and that necessarily had to be involved in the decision-making process¹³.

Furthermore, as mentioned in the introduction, in order to better address the problem at hand¹⁴, the application of the *Analytic Hierarchy Process* was combined with other evaluation procedures, illustrated through the diagram in figure 3.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1 Definition of the conservation status of the colonnade

The study of the conservation status of the colonnade of the *Patio de los Leones* was carried out as part of the WARMEST project activity. This provided the opportunity to collaborate with the project members with a continuous exchange of knowledge.

The phases that characterised the study of the state of conservation of the colonnade¹⁵ were:

- 1) *Analysis of technologies and tools used for the survey of historical heritage*.

A review of the literature showed that among the most frequently used techniques are the *Structure from Motion*¹⁶ (SfM) terrestrial¹⁷ or area¹⁸ survey,

¹³ The patronage of the Alhambra and Generalife directly coordinates all activities concerning the restoration and maintenance processes of the monumental complexes that make up the Alhambra (including the *Patio de los Leones*).

¹⁴ Hierarchization of the 124 columns of the *Patio de los Leones* according to the urgency of restoration.

¹⁵ and generally valid for the study of the state of preservation of historical heritage

¹⁶ SfM is one of the photogrammetric techniques and its peculiarity lies in the way the photographs are taken. The 3D object is in fact generated from photographs that take an object from various points of view and angles of rotation.

¹⁷ Provides for the use of digital cameras.

¹⁸ It consists of the use of UAV instrumentation (drones) integrated with a digital camera.

the survey with LIDAR¹⁹ instrumentation, or through thermographic surveys²⁰ performed with IR camera and detection instrument.

The selection of the most appropriate tool/technique for the scope of the investigation was influenced by two main factors. The first one, of a regulatory nature, concerned the limitations of flight authorisation to which drones are subject within Spanish territory. The need to receive this authorisation every time it was necessary to carry out the survey led the team to choose the SfM technique by land, using digital cameras. The second factor that further endorsed the decision to apply terrestrial SfM was the possibility of easily repeating the survey over time given the availability and inexpensiveness of the instruments used.

2) *Relief of the columns of the Patio de los Leones.*

The survey process took place through the SfM, which allowed the geometric survey to be carried out. The thermographic survey also made it possible to obtain information regarding the physical characteristics of each column with particular reference to the degradation present.

3) *Study of the material that characterises the columns.* A study of the available literature, as well as the contribution of chemical experts and restorers²¹, showed that Macael²² marble is not an ideal material in terms of durability, due to its endogenous characteristics such as anisotropy, texture and structure.

4) *Description of factors causing degradation on columns.*

Having defined the main characteristics of the material, it was possible to gain a better

understanding of the factors causing its degradation.

The process of degradation and alteration is activated mainly by exogenous factors of a physical, chemical and/or biological and anthropic nature that act synergistically with each other. The response of the material to the attack of these agents depends on endogenous factors, i.e. the type of rock, its origin, composition, texture and structure.

It is essential to consider these two factors at the same time, in order not to make mistakes in assessing the state of alteration and the causes that accelerate the degradation process.

In this specific case, the endogenous factors correspond to the characteristics, analysed in the previous phase, of the Macael marble that constitutes the columns. As for the exogenous factors, they are to be found in the context of the *Patio*.

In this regard, information was collected on climate (annual irradiation hours, rainfall data, main wind directions), tourist flow and seismic events.

Seven main factors causing column degradation have been identified [36].

For each one, the mechanical action and a description of how the degradation manifests itself visually²³ is shown in Table 1 [37].

Table 1 - Correlation between factors, mechanisms and visual indicators according to recommendations UNI EN 1182/2006

Factor no.	Mechanical Action	Visual manifestation
1) Solar radiation	Thermal expansion	Swelling-Follation-Detachment
2) Rain	Imbibition-Mechanical action	Efflorescence – Pitting
3) Presence of salt	Mechanical action	Efflorescence – Detachment
4) Earthquakes and vibrations	Mechanical action	Cracks
5) Biological	Biological attacks	Biological patina
6) Frost	Mechanical action	Pitting, Detachment, Cracking
7) Use of monument	Mechanical action	Scratches/Scratches, Fractures

¹⁹ The technique in question allows images and dimensional data to be acquired from the object to be detected at high speed and in a short time, by scanning the object to be detected and directly creating a cloud of points. The instruments used for laser scanning have a field of view similar to that of human eyes and can be controlled remotely by computer if integrated with a GPS system.

Among the instruments that enable laser scanning is the *Light Detection and Ranging* (LIDAR), which was first introduced by NASA in 1970. The LIDAR in operation performs an actual scan of the object of interest by hitting it with a laser pulse. The scan will follow a striped pattern and the set of scanned stripes will give rise to the point cloud of the object under investigation.

²⁰ The thermographic survey makes it possible to obtain a radiometric image based on the infrared image acquired. Complex algorithms are used to calculate the temperature at each point of the radiometric image obtained.

²¹ In order to have a solid scientific background, Professor Anna Arizzi, from the Department of Mineralogy and Petrology of the University of Granada, contributed to this phase of the research.

²² Material forming the columns.

²³ Following the recommendations of UNI EN 1182/2006 - Macroscopic alterations of stone materials.

Figure 1 - Scale of alteration level of Galan Huertos columns (Source 1).

The scale has an increasing trend from the lowest (T1) to the highest (T8) alteration level (LoA):

- LoA - T1 unchanged conditions;
- LoA - T2 initial state of alteration with circular detachments between approximately 0.5 cm and 5 cm in diameter;
- LoA - T3 circular detachments are particularly widespread on the column shaft or in an

advanced stage and usually between 5 and 10 cm in diameter;

- LoA - T4 irregularly shaped detachments between 10 and 15 cm wide and 1 to 1.5 cm long;
- LoA - T5 irregularly shaped detachments between 15 and 20 cm wide and 1 to 2 cm long;
- LoA - T6 detachments of more than 20 cm in width affect the column shaft extensively;
- LoA - T7 detachment more than 20 cm wide with initial erosion of the column;
- LoA - T8 the column shows diffuse pitting over most of its surface.

Galán Huertos also grouped the levels according to a qualitative scale:

- Alteration level Low: T1 to T2
- Medium Alteration Level: T3 to T4
- High Alteration Level: T5 to T6
- Extreme Alteration Level: T7 to T8

After 1989, the conservation status of the columns was monitored again by Saez-Perez in 2004 and 2012.

Figure 2 - Map of alteration level and degradation of the colonnade.

Considering the objective of the research, it was essential to update²⁴ the level of alteration. To this end, following the surveys carried out and described above, a map of the degradation and level of alteration of the colonnade was defined, represented in figure 2.

5) *Diagnosis of column degradation:*

To diagnose the condition of the individual columns, it was essential to analyse the literature, which provided specific data on the degradation of the *Patio de los Leones* and its evolution over time. Three studies from 1989, 2004 and 2012, respectively, were identified that address this issue.

In 1989, Galán Huertos, although he did not describe what degradation affected the various columns, defined a scale to determine the level of alteration. This scale allows a quantitative diagnosis to be made, i.e. the level of deterioration is quantified in relation to the lack of material (in the form of detachment or *pitting*) affecting the shaft of the column (Fig. 1).

3.2 Integrated assessment procedure to safeguard the colonnade of the Patio de los Leones

The methodological procedure²⁵, schematised in Figure 3, although inspired by the needs expressed by the technical manager of the *Patio de los Leones*, can be reproduced and applied to other heritage assets with similar typological and constructional characteristics to the colonnade under examination.

At the apex of the process (fig. 3) is the creation of an HBIM model of the asset under examination, where all the information available for each individual column is inserted[38], thus making data storage compatible with the technologies currently used for cultural heritage *management*.

The identification phase of degradation was carried out by checking for any loss of material from the surface²⁶, as defined by UNI EN 1182/2006.

²⁴ Update at the time of the research, year 2020.

²⁵ This procedure must be carried out for each of the 124 columns in the *Patio de los Leones*.

²⁶ The terms "degradation involving loss of material" and degradation not involving loss of material' are derived from EN 1182/2006.

Figure 3 - Methodological procedure for safeguarding the colonnade.

Where the column under investigation is characterised by degradation that does not lead to loss of material, cleaning measures suitable for the characteristics of the *Macael* marble have been defined.

If, on the other hand, there is a loss of material from the surface of the column, the change in the level of alteration over time²⁷ was assessed.

Five different case studies were considered:

- 1) Level of alteration *unchanged over time*: for these columns, it is necessary to assess the current level of alteration. In the case where this has remained unchanged at high (T5-T6) or extreme (T7-T8) levels, the vulnerability index of the column to each of the identified exogenous factors is calculated. If the average value of the index does not exceed the threshold²⁸ ($Iv_x \geq 2$), the data relative to the column are inserted into the HBIM model but the restoration intervention can be postponed to a later time²⁹. If, on the other hand, this threshold value is exceeded, the priority of the restoration intervention is defined through the application of the *Analytic Hierarchy Process*.
- 2) *Alteration levels varied from low (T1-T2) to medium (T3-T4)*: in this case, annual monitoring of the alteration status is foreseen.
- 3) *The level of alteration of the column varied from medium (T3-T4) to high (T5-T6)*: it is necessary to proceed with the calculation of the vulnerability index of the column and, if necessary, establish the priority of restoration work, following the same procedure described in point 1).
- 4) *Column alteration level varied from high (T5-T6) to extreme (T7-T8)*: again, the process involves the same steps as in 1) and 3).
- 5) *Improved level of alteration following restoration work*: for columns that have already undergone restoration work, monitoring of the level of alteration is required every three years.

²⁷ The timing will depend on the data available. In the case of *Patio de los Leones*, for example, information on the level of alteration has been updated approximately every 7 years since 1989.

²⁸ Following the analysis of the existing literature, it is considered to set a threshold beyond which the value of the vulnerability index is no longer negligible, $Iv_n C_x medio > 2$. The definition of this index is discussed in paragraph 3.3.

²⁹ Considering that the level of alteration has remained unchanged but remains at high or extreme levels, six-monthly monitoring is prescribed to ascertain any changes in the state of the art.

3.3 Definition of columns vulnerability index

To define an index that reflects the vulnerability of the element considered, a study was carried out both on the definition of vulnerability referred to the historical heritage and the indices used to quantify it.

Several authors, including Livraghi et al. [39], Italia et al. [40], Francini et al. [41] and Lazzeri [42], agree in defining vulnerability as an intrinsic characteristic of such heritage, and “expressing the propensity of any exposed element (e.g. buildings, architectural and archaeological artefacts) to be damaged or to degrade due to an external agent related to environmental or anthropogenic hazard conditions”.

In the case in which the vulnerability of the historical heritage has to be determined, the authors proceed with the calculation of a Theoretical Vulnerability Index (TVI), whose estimate is made considering “the extension of the damaging effect of a certain dangerous event on the structural element considered, assuming that this is already affected by a certain type of damage” [42].

In the light of what emerged from the analysis of the literature it can be deduced that the vulnerability index usually calculated for the historical heritage is of a static type. It means that it takes into account the actual state (existing damage) of the element considered.

The intention here was instead to define a vulnerability index that considers the risk of evolution of the already existing degradation as a result of the action of exogenous factors and the morphology of the technical element.

Subsequently, following the proposed methodology all elements whose $Iv_x \geq 2$ (a value above which, as defined in the literature, the vulnerability index is no longer negligible) are subjected to hierarchization.

Below the index created is defined.

$$Iv_x = \frac{\sum_{i=1}^n Dp_i \times \sum_{j=1}^m Ip_j}{m}$$

where

- Iv_x is the vulnerability index of the technical element x ;
- Ip_j is the j th hazard index of degradation of the technical element as a function of the m exogenous factors, related to the specific field of investigation, with values between 0 and 1 specifically assigned by experts.
- $Dp_i = \sum_{i=1}^n d_i \beta_x \times CC_{j=1}^k$ is the damage enhanced with respect to the m -th exogenous factor where:
 - d_i is the value of the n degradations that may affect the technical element, depending on the material from which it is made. This value is

between 0 and 1 and is again determined by experts in the field.

- β_x is a *dummy* variable related to the x-th technical element to highlight or not the presence of each degradation (d_i).
- CC_j correction coefficients; CC_j they take on values 1 or 2 depending on the impact of the m-th exogenous factors on element x. This impact depends on specific morphological characteristics and location of the element x in relation to the context.

Given the definition of all the terms that make up the index the following is about the application of this index to the columns of the *Patio de los Leones*. As explained above, the values of the hazard index Ip_j have been attributed following expert consultation.

By means of a special questionnaire, they were asked to give an opinion on the danger index of each of the exogenous factors identified, with respect to the degradation of the columns. The questionnaire was created using *Google forms* and structured into seven questions³⁰. The experts were selected based on their skills and considering scientific publications relevant to the subjects under investigation.

To search for scientific publications, we used the

search engines of bibliographic databases that collect scientific publications from various disciplinary fields. *Keywords* relating to the field of investigation, such as *Macaes marble* and *Macaes marble columns decay*, were entered in these search engines.

Following the described procedure, about 80 experts were selected³¹ and the questionnaire was sent to each of them by e-mail.

Through the analysis of the answers to the questionnaire, the danger index of the exogenous factors with respect to the degradation of the column was quantified in numerical terms³², as shown in table 3.

Having identified 7 exogenous factors, the subscript j of will vary from 1 to 7.

With regard to enhanced damage $Dp_i = \sum_{j=1}^n d_i \beta_x \times CC_{j=1}^k$ the procedure for calculating and assigning values is shown below.

Starting with d_1 , the subscript i varies from 1 to 6 as six types of degradation have been identified³³.

30 One question for each factor identified (7).

31 A total of 62 replies were received.

32 The experts were given a rating scale from 1 to 9 according to the impact of the exogenous factor considered on the degradation of the columns (score 1 to 2 extremely low impact; 3 to 4 low impact; 5 to 6 medium impact; 7 to 8 high impact; 9 extreme).

33 d1 Foliation; d2 Cracking; d3 Patina; d4 Scratches/scratches; d5 Detachment; d6 Fractures.

Table 3 - Hazard index value of the exogenous factors considered (Patio de los Leones case study)

Codice n.	1	2	3	4	5	6	7
Fattore esogeno	Radiazione solare	Pioggia	Presenza di sale	Terremoti e vibrazioni	Agenti biologici	Gelo	Uso del monumento
Ip	0.8	0.4	0.7	0.4	0.2	0.5	0.8

Table 4 - Values to be attributed to each degradation according to the exogenous factors considered (Patio de los Leones case study)

Degradi	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5	n. 6	n. 7
Fattori esogeni	Radiazione solare	Pioggia	Presenza di sale	Terremoti e vibrazioni	Agenti biologici	Gelo	Uso del monumento
Foliazione (d_1)	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4
Fessurazione (d_2)	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1
Patina (d_3)	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
Rigature/Graffi (d_4)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
Distaccamento (d_5)	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3
Distaccamento (d_6)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2

Expert opinion was also sought on the attribution of $d_1, d_2, \dots, d_6$ expert opinion was also sought³⁴, consulted by means of a questionnaire.

This made it possible to compile the following table 4.

The *dummy* variable β_x on the other hand has the function of indicating the degradations of whether or not column x is affected.

Finally, eight correction coefficients were coded for the morphological and location characteristics of the column:

- CC1: exposure of the column with respect to the cardinal points;
- CC2: column location in relation to the area of structural vulnerability³⁵;
- CC3: column location in relation to area of anthropogenic vulnerability³⁶;
- CC4: type of column base (presence or absence of base) (Fig. 5);

Figure 4 - Column base type.

- CC5: type of column (single, double, triple or quadruple) (Fig. 5);

Figure 5 - Column type-

³⁴ The experts assigned a value ranging from 0 - negligible to 1 - extreme, to the impact that each exogenous factor considered has on the six identified degradations.

³⁵ With reference to the patio structure, a map has been drawn up that identifies 2 different areas where, in the event of an earthquake action, the column may or may not suffer major damage.

³⁶ Three areas have been identified in relation to the route to be followed by tourists around the patio, in which the column is slightly, moderately or very exposed to the effects (touch, scratch, accidental or deliberate blow, etc.) of their passage.

- CC6: type of trunk-capital junction with or without continuity (Fig. 6);

Figure 6 - Type of trunk-capital junction.

- CC7: location of degradation on column face (internal-external-right-left) (Fig. 7);

Figura 7 - Schematizzazione faccia colonna.

- CC8 Location of degradation on column shaft (lower third, middle third, upper third) (Fig. 8).

Figure 8 - Schematic diagram of the column shaft.

Below, for each column, the choice of assigning value 2 to the various weightings is explained CC_j . The choice was made on the basis of the impact of the individual exogenous factors on the column, considering its morphology and location.

– Exogenous factor n. 1, solar radiation: solar

radiation impacts differently on each column depending on the location with respect to the cardinal points; therefore, depending on the column considered, exogenous factor n. 1 can determine that the correction coefficients CC_1 e CC_7 assume value 2.

- *Exogenous factor n. 2, rain:* Rainwater also has a different impact on each of the elements considered. For example, a column without a plinth is more susceptible to the phenomenon of rising water by capillarity. Furthermore, in the case of a combination of rain and wind, certain elevations are more affected³⁷. Therefore, depending on the column considered, the

exogenous factor n. 2 may determine that the correction coefficients CC_1 e CC_7 take on a value of 2.

- *Exogenous factor n. 3, presence of salt:* as noted in the discussion of paragraph 3.1, the surface of the columns most exposed to rain is more characterised by the presence of salts dissolved in water.

Thus, depending on the column considered, the exogenous factor n. 3 may cause the correction coefficient CC_1 a value of 2.

- *Exogenous factor n. 4, earthquakes and vibrations:* the presence or absence of a basement, the type of the trunk-capital junction, the type of column (single, double triple or quadruple) and the location in areas defined as most vulnerable from a structural point of view, are all characteristics that influence the behaviour of the column in case of earthquakes or vibrations.

³⁷ In this regard, in section 3.1.4, the wind direction was studied and which elevations, in the case of a combination with rain, are most exposed.

Table 5 - Choice of correction coefficients according to the exogenous factors considered (Patio de los Leones case)

CC	Radiazione solare	Pioggia	Presenza di sale	Terremoti e vibrazioni	Agenti biologici	Gelo	Uso del monumento
Fattori esogeni							
CC1 - esposizione colonna rispetto a punti cardinali	X	X	X		X	X	
CC2 - localizzazione colonna rispetto ad area di vulnerabilità strutturale				X			
CC3 - localizzazione colonna rispetto ad area di vulnerabilità antropica							X
CC4 - tipologia basamento		X		X			
CC5 - tipologia di colonna				X			
CC6 - tipologia di congiunzione tronco/capitello				X			
CC7 - localizzazione degrado di faccia colonna	X						
CC8 - localizzazione degrado su fusto colonna							X

Thus, depending on the column considered, the exogenous factor No 4 can determine that the weightings CC_2 , CC_4 , CC_5 , CC_6 take on value 2.

- *Exogenous factor n. 5, biological agents*: the proliferation on the surface of the column of biological agents, with reference to plant micro-organisms, will be favoured by certain thermo-hygrometric conditions. The columns most subject to the proliferation of these agents will therefore belong to the elevations which receive the most rain and are exposed to the least amount of solar radiation. Therefore, depending on the column considered, the exogenous factor n. 5 can determine that the correction coefficient CC_1 take on a value of 2.
- *Exogenous factor n. 6, freezing phenomena*: the columns which during the day receive fewer hours of exposure to solar radiation and which are more affected by rainwater are certainly among the most exposed to the phenomenon of frost. Therefore, depending on the column considered, the exogenous factor n. 3 can determine that the correction coefficient CC_1 take on a value of 2.
- *Exogenous factor n. 7, use of the monument*: the degradation, in relation to the location on the shaft of the column, could be more affected by an accidental blow or vandalism. Thus, the correction coefficients identified were the CC_3 (column location with respect to anthropogenic vulnerability area) and CC_8 (location of degradation on column shaft). To have a clear overview, table 5 has been drawn up showing for each exogenous factor which correction coefficient to choose.

As mentioned above, for columns whose Iv_x is greater than 2, we will then proceed with the hierarchy according to the urgency of the restoration work.

3.4 Multi-criteria analysis for prioritisation of intervention

Multi-criteria analyses support the decision-maker when he or she is faced with numerous conflicting evaluations, allowing a compromise solution to be reached in a transparent way [43]. A review of the literature has clearly shown that multi-criteria analyses are a valuable aid in making decisions about heritage. The last step in the methodological process developed by the project is the application of a multi-criteria analysis and in particular of the *Analytic Hierarchy Process*, which is particularly effective when it is necessary to determine a priority among a finite and discrete set of alternatives.

Considering the case study, a three-level problem was defined:

- Level 1: general objective of the assessment (hierarchy of columns according to restoration urgency).
- Level 2: Evaluation criteria (exogenous factors responsible for the degradation of the material).
- Level 3: alternatives subject to assessment (columns with $Iv_x \geq 2$).

The alternatives (columns) will then be prioritised according to a set of criteria (exogenous factors causing column degradation).

In order to ensure an objective judgement for the attribution of a degree of preference between criteria, the opinion of the decision-maker alone may be insufficient. For this reason, the AHP is often assisted by other ad hoc methods or tools for assessing the degree of preference. In this case, it was considered appropriate to use the judgement of experts in the field of study. Once this judgement has been made, a weight is given to each criterion, using Saaty's scale, and then the priority vector of the criteria is calculated.

Figure 9 - Autodesk Revit data sheet with the creation of shared parameters.

3.5 Data management through HBIM model

As previously stated, the origin of the column safeguarding process is the creation of a *Heritage-BIM* (HBIM) model of the asset under examination where all available data for each column is implemented.

The creation of such a model represents a path of critical knowledge, where essential issues are the transparency of information and its reliability.

HBIM, as pointed out by Moyano et al. [44], is an innovative element with respect to the traditional methods of management, cataloguing and valorisation of the historical heritage as it allows the storage of geometric and documentary data together, obtaining easily consultable models. This avoids information redundancy and data dispersion, allowing a more conscious valorisation of the heritage.

The model, in order to be computerised, is created using the elements for architectural modelling available within the families³⁸ that characterise the various *Authoring Software* that allows design in BIM.

Considering the case study, the objective is to create an *ad hoc* datasheet linked to each column, so as to meet the requirements for achieving LoD G³⁹. Within the datasheet, in addition to the parameters already present by default such as location, material, exposure, new shared parameters are created concerning structural characteristics, the state of conservation, the

value of the vulnerability indices for each exogenous factor and finally the position in the intervention hierarchy (Fig. 9).

³⁸ The latter is defined as a "group of elements with a set of common properties called parameters and an associated graphical representation". Their organisation is divided into two main macro-categories called system and loadable respectively. The system families include all the basic elements normally used in a construction process that can be customised within certain limits set by the software. Loadable families, on the other hand, are not present by default in the project environment but can be loaded from external libraries. They too can be customised in terms of shape, composition, appearance and parameterisation of the object. In this case, the system families will be used.

³⁹ The AIA (*American Institute of Architects*) has introduced the concept of LOD, *Level Of Development*. LODs make it possible to establish the real reliability of the information included in a digital model. In the G202- 2013 standard, Building Information Model Protocol Form drawn up by the AIA, the various LOD levels are divided as follows: LOD 100, LOD 200, LOD 300, LOD 350, LOD 400 and LOD 500 according to the increasing information and geometric value given to the element. The Italian standard also gives a definition to the various levels of detail in part 4 of UNI 11337-4 along the lines of the American standard. In particular, the UNI standard makes a distinction of LOD (which in this case is defined as Level of Development of a digital object) for new construction or restoration works. For new construction we have seven levels of LOD ranging from A to G depending on the information and geometric level of the element.

4. RESULTS

The safeguarding process developed and illustrated in figure 3 was applied to the case study, namely the columns of the *Patio de Los Leones*. Once the HBIM model of the asset had been created, the actual computerisation process followed the analysis of each column, described in the following paragraphs.

4.1 Assessment and management of columns with a type of degradation that does not involve loss of material from the surface

For some of the columns on the east⁴⁰ (*Sala de los Reyes*), south⁴¹ (*Sala de Abencerrajes*) and west⁴² (*ala de los Mocarabes*) elevations, no degradation was found that would result in the loss of material from the surface. For these columns, the process directly involves the inclusion of the available data within the HBIM model. The data, in this case, are moreover related to the property of the column (ID, type of trunk-capital junction and basement) and to the results obtained in the analysis phase (current and historical level of alteration). As a demonstration, a technical sheet of the HBIM model is shown below, related to column n. 43 (Fig. 10) and the attached sheet with the photographic repertoire.

4.2 Assessment and management of columns with a type of degradation involving loss of material from the surface

For columns characterised by degradation involving loss of material from the surface, a more complex procedure is involved, which starts with an assessment of the change in the level of alteration over time. Data on the level of alteration are available from 1989 and subsequently updated in 2004, 2012 and finally 2020. As can be seen from the methodological process illustrated in Figure 3, there are five conditions that can occur.

For columns that have maintained an unchanged low⁴³

Parametro	Valore	Formula
Proprietà modello		
Numero identificativo colonna	43	
Localizzazione	Sala de los Reyes	
Esposizione	Est	
Materiale	Marmo di Macael	
Caratteristiche strutturali basamento	Con basamento	
Caratteristiche strutturali tronco-capitello	Senza soluzione di continuità	
Caratteristiche strutturali tipologia colonna	Doppia	
Stato di conservazione degradi tipo A	Non presenti	
Stato di conservazione degradi tipo B	Non presenti	
Stato di conservazione lossi: degrado su faccia	n.d.	
Stato di conservazione lossi: degrado su fusto	n.d.	
Stato di conservazione LA 1989	T1	
Stato di conservazione LA 2004	T1	
Stato di conservazione LA 2012	T1	
Stato di conservazione LA 2020	T1	
Stato di conservazione Variazione (LA)	Invariato basso	
Interventi consigliati	n.d.	
Vulnerabilità Iud	n.d.	

Figure 10 - Datasheet column no. 43.

or medium-level⁴⁴ or that have evolved from low to medium⁴⁵, annual monitoring of the alteration status is foreseen.

With regard to columns whose level of alteration has changed over time from medium to high (T3- T4 to T5-T6), from high to extreme (T5-T6 to T7- T8) or if it has remained unchanged at high or extreme levels, the safeguard procedure involves calculating the vulnerability indices of the columns with respect to each identified exogenous factor⁴⁶. As can be seen from Figure 11, most of the columns for which the vulnerability index had to be calculated are located in the north elevation of the *Patio* (*Sala de dos Hermanas*).

Columns no. 1-5-7-8-120-123-124, whose was greater than 2, were prioritised according to the urgency of restoration.

The calculations resulting from the application of the AHP resulted in the following hierarchy of intervention:

column no.123 (22% preference);

⁴⁰ Columns No. 31-30-28-43-44-45-46-47.

⁴¹ Columns No. 50-51-52-53-54-55-71-72-73-74.

⁴² Columns no. 111-113-114-117.

⁴³ Rientrano in questa categoria la maggior parte delle colonne che caratterizzano il Patio ed in particolare le n. 12-13-110 del prospetto Nord (*Sala de dos Hermanas*); le colonne n. 14 - 15 - 16 - 17-18-19-20-21-22-23-25-26- 29-34-35-37-38-39-40-42-48-49 del prospetto Est (*Sala de los Reyes*); le colonne n. 56- 57-58- 59-60- 61-62-63- 66-67-68-69-70-75-76 of the south elevation (*Sala de Abencerrajes*); columns 77-78-79-86-87-88-90-91-92- 93-95-100-103-104-105-107-108-109 of the west elevation (*Sala de los Mocarabes*).

⁴⁴ Nos 41-32-24 on the east elevation, 96-97-98 on the west elevation and only No 110 on the north elevation.

⁴⁵ Nos. 41-32-24 on the West elevation and only No. 115 on the North elevation

⁴⁶ The columns falling under the above conditions and for which the vulnerability index will be calculated are divided as follows: Columns whose level of alteration has changed from medium to high: nos. 2 - 6 -9 -122 on the north elevation; nos. 99-101 on the west elevation; Columns that have undergone a change in the level of alteration from high to an extreme: nos. 7-8-118-119-120- 121-123-124 of the north elevation; Columns with an unchanged level of alteration extreme: no. 5 north elevation; Columns with unchanged high level of alteration: nos. 1- 3-116 of the north elevation.

Figure 11 - Identification of columns subject to the vulnerability index calculat.

column no. 120 (18% preference);
column no. 7 (15% preference);
column no. 1 (14% preference);
column no. 124 (13% preference);
column no. 8 (12 % preference);
column no. 5 (5% preference).

These are easily identifiable within the HBIM model as they are characterised by a different colour gradient⁴⁷ as shown in figure 12.

5. CONCLUSIONS AND FUTURE DEVELOPMENTS

The methodology described in this article allows the hierarchization of technical elements with an advanced and similar level of degradation to guarantee their safeguarding and to facilitate the managing team in the selection procedures concerning restoration works.

Although applied to the case of the *Patio de los Leones*

it is applicable to contexts where the historical heritage is characterised by a large number of recurring elements (cloisters, colonnades, etc.).

Specifically, we want to highlight the aspects of the methodology (fig. 3) that make it replicable and innovative.

Through the identification of the level of alteration (LoA) of the technical element it is possible to assess and quantify the evolution of degradation, considering its variation over time.

This step makes it possible to select the most vulnerable elements, i.e. those that have shown a worsening trend in the defined time frame (e.g. LoA changed from medium to high, or from high to extreme).

Elements belonging to this category are subject to the vulnerability index assessment.

The innovation given by this index derives from the definition of the enhanced damage Dp_i which, through its component terms d_i (damage enhancement index) and CC_j (corrective coefficients), allows us to jointly consider exogenous factors, endogenous and morphological characteristics that refer to the conformation of the column.

⁴⁷ In particular, the darkest shade of red will indicate the first column in hierarchical order.

Figura 12 - HBIM model of the Patio de los Leones showing priority of intervention on columns.

The elements that were found to be most vulnerable were prioritised according to the urgency of restoration, through the application of *the Analytic Hierarchy Process*.

Another advantage provided by the application of the methodology concerns the management of the data coming from the analysis phases through the definition of an HBIM model and the technical sheets associated to each element. Specifically, these data sheets have been customised through the creation of new shared parameters which allow the insertion of data relating to structural characteristics, the state of conservation, the value of the vulnerability indices for each exogenous factor and finally the position of the element in the intervention hierarchy.

In this way the data can be easily updated and

consulted by technicians and managing bodies.

As far as future development is concerned it is intended to continue research into the vulnerability index and its possible development, considering the dependence between exogenous factors and degradation as a whole.

In addition, the correction coefficients will be implemented in such a way that they can also take into account aspects relating to the continuous monitoring of the element.

The future objective therefore concerns the definition of an operational tool aimed at the managing team or administration which is *user friendly* but at the same time capable of assessing the possible balances between the necessary levels of conservation, maintenance and possible uses.

*Giovanna Acampa, Professore Associato – Università di Firenze, Dipartimento di Architettura (DIDA) – Università Kore di Enna, Facoltà di Ingegneria e Architettura
e-mail: giovanna.acampa@unikore.it

**M. Grasso, PhD – Università Kore di Enna, Facoltà di Ingegneria e Architettura
e-mail: mariolina.grasso@unikore.it

Authors' contribution

This paper is the result of the joint work of the authors. "Abstract", "Introduction" and "Conclusion and future developments" were written jointly by all authors. Mariolina Grasso wrote "Materials and Methods" and "Results". Giovanna Acampa supervised the manuscript and funded.

Bibliography

- [1] WARMEST EU PROJECT – IoW Altitude Remote sensing for the Monitoring of the state of cultural hEritage Sites: building an inTegrated model for maintenance. <http://warmestproject.eu/> (consultato nov. 22, 2019).
- [2] Girard L.F., *La valutazione delle risorse architettonico-culturali*, p. 12.
- [3] Ivanitskaya L., Clark D., Montgomery G e Primeau R., «[No title found]», *Innov. High. Educ.*, 2002, vol. 27, n. 2, pp. 95–111, doi: 10.1023/A:1021105309984.
- [4] Mondini G., *An Integrated Approach for Assessing Environmental Damage and (Inter)Generational Debt in the Definition of Territorial Transformation Policies*, in *Integrated Evaluation for the Management of Contemporary Cities*, Cham, 2018, pp. 1–15.
- [5] Copiello S. e Bonifaci P., *Internazionalizzazione della disciplina estimativa italiana: evidenze dalla didattica e dalla ricerca di dottorato in un campione di Università*, n. 18, 2017, p. 11.
- [6] Buonincontri P., Caneva G., Maurano C. e Simeon M.I., *Il patrimonio culturale materiale e immateriale*, p. 6.
- [7] GAZZETTA UFFICIALE, <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1964/05/26/064U0310/sg> (consultato feb. 24, 2021).
- [8] GAZZETTA UFFICIALE, <https://www.gazzettaufficiale.it/dettaglio/codici/beniCulturali> (consultato feb. 23, 2021).
- [9] Barbati C., Sciuolo G. e G. Cammelli G., *A c. di, Il diritto del patrimonio culturale*, Bologna: Il mulino, 2017.
- [10] L. 44/08.03.2017: *Tutela e valorizzazione patrimonio culturale immateriale*, Regioni.it, apr. 07, 2017. <http://www.regioni.it/news/2017/04/07/l-4408-03-2017-tutela-e-valorizzazione-patrimonio-culturale-immateriale-508516/> (consultato feb. 24, 2021).
- [11] Manzetti V., *Il patrimonio culturale immateriale tra ordinamento internazionale, europeo e nazionale. Spunti dall'esperienza spagnola*, vol. Nomos, n. 3, 2018.
- [12] FANTINI S., *Beni culturali e valorizzazione della componente immateriale*, Aedon, 2014, n. 1, pp. 0–0, doi: 10.7390/76266.
- [13] FISHBURN P.C., *Letter to the Editor-Additive Utilities with Incomplete Product Sets: Application to Priorities and Assignments*, *Oper. Res.*, giu. 1967, vol. 15, n. 3, pp. 537–542, doi: 10.1287/opre.15.3.537.
- [14] MILLER D.W., *Executive decisions and operations research*, 1963.
- [15] ZAVADSKAS E.K., TURSKIS Z. e ANTUCHEVICIENE J., *Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment*, *Electron. Electr. Eng.*, vol. 122, n. 6, pp. 3–6, giu. 2012, doi: 10.5755/j01.eee.122.6.1810.
- [16] SAATY T.L., *How to make a decision: the analytic hierarchy process*, vol. European journal of operational research, 1990, n. 48.1, pp. 9–26.
- [17] ROY B., *Classement et choix en présence de points de vue multiples*, *Rev. Fr. Inform. Rech.* Opérationnelle, 1968, vol. 2, n. 8, pp. 57–75, doi: 10.1051/ro/196802V100571.
- [18] HWANG C.L. e MASUD A.S.M., *Multiple objective decision making-methods and applications: a state-of-the-art survey*, Springer Science & Business Media, 2012, vol. 164.
- [19] BRANS J.P. e VINCKE PH., *Note-A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making)*, *Manag. Sci.*, giu. 1985, vol. 31, n. 6, pp. 647–656, doi: 10.1287/mnsc.31.6.647.
- [20] OPRICOVIC S., *Multicriteria optimization of civil engineering systems*, *Fac. Civ. Eng. Belgrade*, 1998, vol. 2, n. 1, pp. 5–21.
- [21] BRAUERS W.K.M. e ZAVADSKAS E.K., *Project management by multimooora as an instrument for transition economies / projekt vadyba su multimooora kaip priemon pereinamojo laikotarpio kiams*, *Technol. Econ. Dev. Econ.*, mar. 2010, vol. 16, n. 1, pp. 5–24, doi: 10.3846/tede.2010.01.
- [22] RIBERA F., NESTICÒ A., CUCCO P. e MASELLI G., *A multicriteria approach to identify the Highest and Best Use for historical buildings*, *J. Cult. Herit.*, gen. 2020, vol. 41, pp. 166–177, doi: 10.1016/j.culher.2019.06.004.
- [23] HAROUN H.-A.A.F., BAKR A.F. e HASAN A.E.-S., *Multi-criteria decision making for adaptive reuse of heritage buildings: Aziza Fahmy Palace, Alexandria, Egypt*, *Alex. Eng. J.*, giu. 2019, vol. 58, n. 2, pp. 467–478, doi: 10.1016/j.aej.2019.04.003.
- [24] FORTE F., DEL GIUDICE V., DE PAOLA P. e TROISI F., *Erratum: Forte F. et al. Valuation of the Vocationality of Cultural Heritage: The Vesuvian Villas. Sustainability 2020, 12, 943*, *Sustainability*, mar. 2020, vol. 12, n. 5, p. 2069, doi: 10.3390/su12052069.
- [25] WANG Q., YANG C., LU J., WU F. e XU R., *Analysis of preservation priority of historic buildings along the subway based on matter-element model*, *J. Cult. Herit.*, set. 2020, vol. 45, pp. 291–302, doi: 10.1016/j.culher.2020.03.003.
- [26] DELLA SPINA L., *Adaptive Sustainable Reuse for Cultural Heritage: A Multiple Criteria Decision Aiding Approach Supporting Urban Development Processes*, *Sustainability*, feb. 2020, vol. 12, n. 4, p. 1363, doi: 10.3390/su12041363.
- [27] APPIOTTI F. et al., *Definition of a Risk Assessment Model within a European Interoperable Database Platform (EID) for Cultural Heritage*, *J. Cult. Herit.*, nov. 2020, vol. 46, pp. 268–27, doi: 10.1016/j.culher.2020.08.001.
- [28] OPPIO A. e DELL'OVO M., *Cultural Heritage Preservation and Territorial Attractiveness: A Spatial Multidimensional Evaluation Approach, in Cycling & Walking for Regional Development*, Pileri P. e Moscarelli R., A c. di Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 105–125. doi: 10.1007/978-3-030-44003-9_9.
- [29] BOTTERO M., D'ALPAOS C. e OPPIO A., *Ranking of Adaptive Reuse Strategies for Abandoned Industrial*

Heritage in Vulnerable Contexts: A Multiple Criteria Decision Aiding Approach, Sustainability, vol. 11, n. 3, p. 785, feb. 2019, doi: 10.3390/su11030785.

[30] FERRETTI V., BOTTERO M. e MONDINI G., *Decision making and cultural heritage: An application of the Multi-Attribute Value Theory for the reuse of historical buildings*, J. Cult. Herit., nov. 2014, vol. 15, n. 6, pp. 644–655, doi: 10.1016/j.culher.2013.12.007.

[31] TORRIERI F., OPPIO A. e ROSSITTI M., *Cultural Heritage Social Value and Community Mapping*, in *New Metropolitan Perspectives*, vol. 178, Bevilacqua C., Calabrò F. e Della Spina L., A c. di Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1786–1795. doi: 10.1007/978-3-030-48279-4_169.

[32] CAMPO O., BATTIST, F. e ACAMPA G., *Integrated Multi-criteria Assessments in Support of the Verifying the Feasibility of Recovering Archaeological Sites: The Case of Portus-Ostia Antica*, in *New Metropolitan Perspectives*, vol. 178, Bevilacqua C., Calabrò F. e Della Spina L., A c. di Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1952–1961. doi: 10.1007/978-3-030-48279-4_184.

[33] SALVO F., DELL’OVO M., TAVANO D. e SDINO L., *Valuation Approaches to Assess the Cultural Heritage*, in *New Metropolitan Perspectives*, vol. 178, Bevilacqua C., Calabrò F. e Della Spina L., A c. di Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1746–1754. doi: 10.1007/978-3-030-48279-4_165.

[34] FORTE F., DEL GIUDICE V., DE PAOLA P. e DEL GIUDICE F.P., *Cultural Heritage and Seismic Disasters: Assessment Methods and Damage Types*, in *Appraisal and Valuation*, Morano P., Oppio A., Rosato P., Sdino L. e Tajani F., A c. di Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 163–175. doi: 10.1007/978-3-030-49579-4_12.

[35] CELADYN M., *Interior Architectural Design for Adaptive Reuse in Application of Environmental Sustainability Principles*, Sustainability, lug. 2019, vol. 11, n. 14, p. 3820, doi: 10.3390/su11143820.

[36] ACAMPA G. e GRASSO M., *Heritage Evaluation: restoration plan through HBIM and MCDA*, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., nov. 2020, vol. 949, p. 012061, doi: 10.1088/1757-899X/949/1/012061.

[37] CNR, *Normal 20/85: Interventi conservativi:*

progettazione esecuzione e valutazione preventiva, Roma, 1985.

[38] ACAMPA G., GRASSO M., MARINO G. e PARISI C.M., *Tourist Flow Management: Social Impact Evaluation through Social Network Analysis*, Sustainability, gen. 2020, vol. 12, n. 2, p. 731, doi: 10.3390/su12020731.

[39] LIVRAGHI C., PIANEZZE F. e SCALTRITTI M., *Attività ispettiva sulle aree archeologiche milanesi. Analisi documentale, valutazione del degrado e delle condizioni di rischio*, LANX Riv. Della Scuola Spec. Archeol. - Univ. Degli Studi Milano, 2014, n. 19, Art. n. 19, doi: 10.13130/2035-4797/4887.

[40] Italia, Ministero per i beni e le attività culturali, Moro L. e Neri A., *Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale: allineamento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni: circolare n. 26, 2 dicembre 2010*. Roma: Gangemi, 2010.

[41] FRANCINI C., CHIESI D., MONTACCHINI A. e PORCILE M., *Appunti per un modello di Valutazione di Impatto sul Patrimonio (HIA)*, p. 51.

[42] LAZZERI E., *Un modello multi-hazard per la valutazione del rischio dei beni archeologici: il caso sperimentale della Villa Adriana di Tivoli*, Archeologia e Calcolatori n. XXII - 2011, gen. 01, 2011. http://www.archcalc.cnr.it/journal/id.php?id=oai:www.archcalc.cnr.it/journal/A_C_oai_Archive.xml:683 (consultato gen. 20, 2021).

[43] GRECO S., EHRGOTT M. e FIGUEIRA J.R., A c. di, *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, Second edition. New York Heidelberg Dordrecht: London: Springer, 2016.

[44] MOYANO J., ODRIÓZOLA C.P., NIETO-JULIÁN J.E., VARGAS J.M., BARRERA J.A. e LEÓN J., *Bringing BIM to archaeological heritage: Interdisciplinary method/strategy and accuracy applied to a megalithic monument of the Copper Age*, J. Cult. Herit., vol. 45, pp. 303–314, set. 2020, doi: 10.1016/j.culher.2020.03.010.dyn, “Interior Architectural Design for Adaptive Reuse in Application of Environmental Sustainability Principles,” *Sustainability*, vol. 11, no. 14, p. 3820, Jul. 2019, doi: 10.3390/su11143820.

Metodi di Valutazione Integrati all'HBIM per la Gestione del Patrimonio Storico: il caso del Colonnato del Patio de los Leones, Alhambra-Granada

G. Acampa*, M. Grasso**

parole chiave: valutazione patrimonio storico, salvaguardia, indice vulnerabilità, HBIM, AHP

Abstract

Il patrimonio storico culturale ha un ruolo fondamentale dal punto di vista sociale. Uno degli obiettivi primari per i paesi europei è quello di garantirne la salvaguardia per consentirne la fruizione alle generazioni future. In questo articolo si definisce una procedura utile alla conservazione di tale patrimonio che spesso verte in condizioni di degrado molto avanzate e che i cambiamenti climatici ed il crescente numero di turisti mettono ulteriormente a rischio. Nello specifico, la metodologia consta di tre passaggi fondamentali: l'individuazione degli elementi tecnici sui quali è necessario un intervento, la valutazione del livello di vulnerabilità di tali elementi tenendo conto dei fattori esogeni e delle caratteristiche

morfologiche e di localizzazione, e la gerarchizzazione degli elementi maggiormente vulnerabili attraverso l'applicazione dell'Analytic Hierarchy Process. Il caso applicativo, è il "Patio de los Leones", sito di fama mondiale all'interno dell'Alhambra e del Generalife, che attira a Granada, in Spagna, oltre 2 milioni di turisti ogni anno. Il fine, nel caso studio, è quello di definire le priorità d'intervento sulle 124 colonne in marmo di "Macael" che necessitano di delicati interventi di restauro.

La verifica della metodologia, l'archiviazione e gestione dei dati per giungere alla gerarchizzazione degli interventi di restauro è stata fatta attraverso un modello HBIM.

1. INTRODUZIONE

L'obiettivo del presente studio¹ è definire una procedura utile alla valutazione delle priorità d'intervento in contesti in cui il patrimonio storico-artistico è caratterizzato da un elevato numero di elementi tecnici ricorrenti; la procedura è pensata per essere d'aiuto agli enti che gestiscono siti del genere per ottimizzare la tempistica degli interventi manutentivi². Verrà fatto particolare riferimento al colonnato del chiostro del *Patio de los Leones*, cuore del sito di fama mondiale dell'Alhambra e del Generalife, che attira a Granada, in Spagna, oltre 2 milioni di turisti ogni anno.

Lo studio è stato articolato in diverse fasi: la prima, di carattere generale, ha riguardato lo studio dello stato dell'arte rispetto a due tematiche:

- a) la definizione di patrimonio storico e della sua salvaguardia nelle normative di riferimento;
- b) l'individuazione dei principali metodi per la valutazione e la salvaguardia del patrimonio storico.

La seconda fase, è stata incentrata sulla scelta dell'ambito di indagine³. In particolare, a seguito di diversi colloqui con il Direttore del Servizio di Conservazione del Patrimonio dell'Alhambra e Generalife⁴ è emersa l'esigenza di individuare una metodologia atta a garantire la salvaguardia, del cospicuo numero di colonne⁵ che costituiscono il *Patio de los Leones*.

¹ Il presente articolo è la sintesi della Tesi di Dottorato svolta nell'ambito del Corso di Dottorato in Infrastrutture Civili per il Territorio XXXIII Ciclo presso l'Università Kore di Enna, dal titolo "Metodi di Valutazione Integrati all'HBIM per la Gestione del Patrimonio Storico: il caso del Colonnato del *Patio de los Leones*, Alhambra-Granada" discusso dall'Arch. Mariolina Grasso, Tutor Prof.ssa Giovanna Acampa.

² Tale esigenza si è manifestata durante l'attività di ricerca scientifica condotta nell'ambito del progetto europeo WARMEST (*IoT Altitude Remote sensing for the Monitoring of the state of cultural hEritage Sites: building an integrated model for maintenance*) [1], incentrato sull'*heritage management*. Il progetto WARMEST è stato finanziato con i fondi europei H2020- Marie Skłodowska-Curie Actions-RISE-2017. L'obiettivo strategico del progetto è quello di creare un Sistema di Supporto Decisionale (*Decision Support System*) per effettuare un'analisi del rischio del patrimonio storico. Partecipano al consorzio internazionale multisettoriale 30 ricercatori appartenenti a:

– 3 istituzioni accademiche: Università di Granada (Spagna) - Università Kore di Enna (Italia) - Industrial System Institute, Atene (Grecia);

– 4 aziende private: CTAdventure, Danzica (Polonia) - Enginlife, Milano, (Italia) - ITEM Media, Granada (Spagna) - Zenon, Milano e Firenze (Italia); 1 associazione: ARTES (Spagna).

³ La scelta dell'ambito di indagine è avvenuta tra i siti pilota del progetto WARMEST ovvero il *Patio del Los Leones* facente parte del complesso monumentale dell'Alhambra e Generalife (Granada, Spagna), il sito subacqueo delle Colonne detto Marzamemi 1 (Sicilia, Italia) ed il secondo Chiostro di Brunelleschi della Basilica di Santa Croce (Firenze, Italia).

⁴ Ente gestore del *Patio de los Leones*.

⁵ 124 colonne

Tale metodologia deve tenere in considerazione la diversa vulnerabilità di ciascuna colonna ai fattori endogeni ed esogeni, come, ad esempio, la sua peculiare esposizione al sole.

L'analisi dell'ambito di indagine è stata al centro della terza fase dello studio, nella quale sono state analizzate le principali tecniche e strumenti per il rilievo del patrimonio storico, al fine di scegliere quelle più idonee alle peculiarità del caso studio.

È stato quindi descritto il percorso di rilievo *in situ* che determina puntualmente lo stato di conservazione delle colonne.

Nella quarta fase dello studio è stata definita una procedura di valutazione atta a stabilire le azioni da intraprendere per ottimizzare le tempistiche degli interventi di salvaguardia delle colonne.

Suddetta procedura è basata:

- 1) sull'individuazione del livello di alterazione delle colonne (LA);
- 2) il calcolo di un indice di vulnerabilità (Iv) per ogni colonna, in funzione dei fattori esogeni e delle caratteristiche morfologiche e di localizzazione che ne causano il degrado;
- 3) in funzione al valore dell'indice di vulnerabilità ottenuto, sull'applicazione di un'analisi di tipo multicriteriale ed in particolare l'*Analytic Hierarchy Process*, per la determinazione della priorità di intervento di restauro tra le diverse colonne.

È stato previsto, inoltre, l'utilizzo di un modello HBIM⁶ per la gestione di tutti i dati raccolti.

Infine, la quinta ed ultima fase si è focalizzata sull'analisi dei risultati ottenuti dall'applicazione della procedura valutativa al caso studio.

Lo studio si è svolto in un contesto interdisciplinare dove, al fine di raggiungere l'obiettivo e definire un metodo e dei risultati attendibili dal punto di vista scientifico, è stato necessario interfacciarsi e collaborare con diverse figure, in particolare con esperti restauratori e conoscitori del bene oggetto d'esame⁷.

In questo senso, sia nel panorama italiano che internazionale, diversi studiosi riconoscono che le metodologie di

⁶ Il termine H-BIM (*Heritage or Historic Building Information Modeling*) è stato usato per la prima volta da Murphy et al. [2] del Dublin Institute of Technology. Secondo Murphy, l'H-BIM persegue la modellazione e la documentazione di elementi architettonici, secondo tipologie artistiche, storiche e costruttive. Inoltre, l'H-BIM è considerato una speciale libreria di oggetti parametrici BIM progettata ad hoc per favorire la conservazione e la gestione del patrimonio storico.

⁷ In tal senso si evidenzia che la fase di ricerca è stata supportata dalla collaborazione della Prof.ssa Anna Arizzi del Dipartimento di Petrologia e Mineralogia dell'Università di Granada, nonché esperto conoscitore del materiale (Marmo di Macael) costituente le colonne del *Patio de los Leones*.

valutazione multicriteriali sono fondamentali per porre a confronto diverse alternative.

Nel 1992 Girard [3] affermava che “la percezione della qualità di una risorsa architettonico culturale è per sua stessa natura multidimensionale, perché si riferisce alla configurazione, [...] alla sua complessità alla sua unicità etc..”

Come evidenziato da Ivanitskaya et al. [4], la disciplina estimativa e valutativa viene frequentemente affiancata ed integrata ad altre materie tecniche.

Mondini [5], sottolinea l'importanza dell'integrazione tra diverse discipline al fine di supportare e agevolare il valutatore nel processo di *decision making* con particolare riferimento alla trasformazione sostenibile del territorio. In questo senso anche Copiello et al. [6], evidenziano la stretta integrazione dell'estimo e della valutazione con discipline tecniche affini, soprattutto considerando l'attuale transizione verso edifici ad elevata sostenibilità ed efficienza.

Nel 2018, in occasione del convegno “Estimo: questioni contemporanee 4.0”, organizzato dalla SIEV (Società Italiana di Estimo e Valutazione), Stanghellini si soffermò sull'identità ed in generale sulla trasversalità che caratterizza la disciplina estimativa.

Per quanto riguarda il patrimonio storico, le decisioni da intraprendere riguardanti la sua salvaguardia si basano su una serie di criteri multipli ed eterogenei, spesso in conflitto, così come sulle preferenze dei vari stakeholder. In questo contesto, gli approcci multicriteriali forniscono un quadro teorico e metodologico adeguato ad affrontare la complessità delle strategie di valorizzazione e salvaguardia.

1.1 Descrizione dell'ambito d'indagine

Il *Patio de los Leones* fa parte del complesso monumentale dell'*Alhambra* e *Generalife*, di Granada. In particolare si trova all'interno di Palazzo *Nazaries*, costruito durante il regno di Maometto V (1354-59 e 1362-91) e considerato la manifestazione più importante dell'arte granadina *Nazarí*, sia come culmine dello stile precedentemente in uso sia per le innovazioni che introduce.

Il *Patio* ha una pianta rettangolare di 28,5 x 15,7 m, con gallerie su tutti i lati sostenute da 124 colonne di marmo *Macael*. Alcune di queste sono singole, altre doppie o in gruppi di tre o quattro negli angoli. Al centro di ognuno dei lati 2 più corti si trova un piccolo tempio quadrato sempre sostenuto dalle colonne. Al centro del cortile si trova la famosa fontana con una pianta dodecagonale sostenuta dai dodici leoni, il cui aspetto arcaico ha portato a molte ipotesi sulla sua origine. Al *Patio* si accede dalla galleria Ovest, passando dalla *Sala de los Mocarabes*. In particolare a metà di ognuna delle altre 3 gallerie si trovano altrettante sale ovvero la *Sala de dos Hermanas* (galleria nord), la *Sala de dos Reyes* (galleria est) e la *Sala de Abencerrajes* (galleria sud). Le colonne che sostengono le gallerie hanno un diametro di circa 22 cm e sono alte

(dalla base al capitello) circa 2,2 m. Sulla parte alta del fusto (terzo superiore) si trovano diversi anelli di innesto al doppio capitello, cilindrico alla base e cubico all'estremità superiore. Sui capitelli sono posti degli spessi abachi in marmo bianco che hanno la funzione di sostenere i pilastri di mattoni su cui poggiano le travi di legno che costituiscono gli architravi orizzontali. Le decorazioni in gesso, intonaco e *muqarnas* contribuiscono ad eliminare qualsiasi apparenza di pesantezza strutturale, conferendo grande leggerezza all'insieme.

2. STATO DELL'ARTE

2.1 Definizioni di patrimonio storico, della sua salvaguardia e principali normative di riferimento

Al fine di proporre una definizione univoca e oggettiva del concetto di patrimonio storico, sono state studiate le principali carte e direttive che possono essere applicate universalmente. Escludendo la Carta di Atene (1931), che prende in considerazione la conservazione del patrimonio artistico e archeologico senza definirlo⁸, il primo testo che fornisce una definizione del concetto di patrimonio è la Carta internazionale di Venezia (1964). Nell'introduzione, viene data una prima definizione di patrimonio ovvero “*Le opere monumentali dei popoli, recanti un messaggio spirituale del passato, rappresentano, nella vita attuale, la viva testimonianza delle loro tradizioni secolari. L'umanità, che ogni giorno prende atto dei valori umani, le considera patrimonio comune, riconoscendosi responsabile della loro salvaguardia di fronte alle generazioni future.*” Come sottolineato da Buonincontri et al. [6], i documenti successivi alla Carta di Venezia si concentrano su due questioni diverse: la definizione dei principi generali per l'identificazione di nuovi campi di conservazione e il tentativo di integrare i principi di salvaguardia con i sistemi di controllo del territorio e dello sviluppo economico e sociale.

Nel 1975 il Comitato dei Ministri del Consiglio d'Europa promulga la Carta di Amsterdam - Carta europea del patrimonio architettonico, in cui l'architettura singolare dell'Europa viene riconosciuta quale patrimonio comune di tutti i popoli che la compongono e viene affermata l'intenzione degli stati membri di cooperare tra loro al fine di proteggerla.

⁸ Si parla soprattutto della conservazione del patrimonio artistico e archeologico e poi dei monumenti storici, delle opere d'arte, ma senza approfondire il concetto di patrimonio. Questo approccio normativo nella definizione del patrimonio storico può essere visto anche in un altro documento internazionale: la Carta europea del patrimonio architettonico di Amsterdam (1975). Queste definizioni di natura normativa possono essere trovate più in dettaglio nella convenzione di Grenada per la protezione del patrimonio architettonico europeo (1985).

[La Carta di Cracovia nel 2000, dichiara esplicitamente di rifarsi ai principi espressi dalla Carta di Venezia, ma introduce il concetto di patrimonio e non più di monumento architettonico. Quindi principi di restauro non si applicano solo agli edifici più importanti ma agli interi centri storici.

La Carta di Cracovia, inoltre, si pone l'obiettivo di sensibilizzare alla conservazione e manutenzione dell'intero territorio, comprese le aree paesaggistiche non costruite, in quanto custodisce elementi molto significativi della storia e della cultura umana.

In Italia più recentemente, il 23 settembre 2020, la Camera dei Deputati ha ratificato in via definitiva la "Convenzione quadro del Consiglio d'Europa sul valore del patrimonio storico per la società", emanata a Faro (Portogallo) il 27 ottobre 2005.

La Convenzione, a oggi ratificata da 19 Paesi membri del Consiglio d'Europa, si fonda sul presupposto che la conoscenza e l'uso dell'eredità culturale rientrano pienamente fra i diritti umani, ed in particolare nell'ambito del diritto dell'individuo a prendere liberamente parte alla vita culturale della comunità e a godere delle arti, come previsto dalla Dichiarazione universale dei diritti dell'uomo del 1948 e dal Patto internazionale sui diritti economici, sociali e culturali del 1966.

Nello specifico, la Convenzione di Faro intende promuovere una comprensione più ampia del patrimonio storico e del suo rapporto con le comunità che lo hanno prodotto ed ospitato, riconoscendo il "patrimonio storico" come l'insieme delle risorse ereditate dal passato, riflesso di valori e delle credenze, e la "comunità patrimoniale" quale insieme di persone che attribuiscono valore a quel patrimonio. Il testo, che integra gli strumenti internazionali esistenti in materia, definisce gli obiettivi generali e suggerisce possibilità di intervento da parte degli Stati firmatari, in particolare in ordine alla promozione di un processo partecipativo di valorizzazione del patrimonio storico. La Convenzione non impone specifici obblighi di azione per i Paesi firmatari, lasciando ad essi la libertà di decidere sui mezzi più convenienti per l'attuazione delle misure in esso previste.

Sostanzialmente la Convenzione rimarca il valore e il potenziale del patrimonio storico come risorsa per lo sviluppo durevole e per la qualità della vita e individua il "diritto al patrimonio storico", riconoscendo la responsabilità individuale e collettiva nei suoi confronti e sottolineando l'importanza della sua conservazione ed il suo ruolo nella costruzione di una società pacifica e democratica.

La Convenzione definisce quindi i diritti e le responsabilità concernenti il patrimonio storico e fissa l'impegno per le Parti firmatarie a riconoscere il suo interesse pubblico, a valorizzarlo, a predisporre disposizioni legislative conseguenti e a favorire la partecipazione alle attività ad esso correlate.

Analizzate le principali convenzioni a livello internazionale, utili alla definizione di patrimonio storico materiale

ed immateriale, è opportuno approfondire il contesto normativo di riferimento e le principali definizioni di patrimonio storico in Italia ed in Spagna. Guardando all'Italia, è certo che questa si presenta come una nazione contraddistinta da numerosissime "tradizioni", che interessano l'intero territorio da Nord a Sud, e che non possono essere trascurate, ma anzi che devono, come affermato a livello internazionale ed europeo, essere "salvaguardate".

Questa concezione si è manifestata abbastanza precocemente, prima ancora della creazione del Ministero dei Beni Culturali e Ambientali (Mibac). Il riferimento d'obbligo è al documento prodotto al termine dei suoi lavori, nel 1966, dalla Commissione parlamentare (istituita con Legge 26 aprile 1964, n. 310) presieduta dall'on. Francesco Franceschini, che definì bene culturale *"tutto ciò che costituisce testimonianza materiale avente valore di civiltà"* [7].

Tuttavia, più di recente ed in particolare con l'entrata in vigore nel 2004 del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, la scelta è stata quella di restringere la disciplina per la salvaguardia del patrimonio storico al solo contesto dei beni culturali materiali. L'art. 2, comma 2 del Codice, afferma che *"sono beni culturali le cose immobili e mobili che presentano interesse artistico, storico, archeologico, etnoantropologico, archivistico e bibliografico, e le altre cose individuate dalla legge o in base alla legge quali testimonianze aventi valore di civiltà"* [8].

C'è allora da chiedersi se l'esclusione del patrimonio culturale immateriale dal Codice, debba comportare il riconoscimento dell'esistenza di una categoria del genere [9]. In realtà, è sufficiente una rapida analisi delle normative nazionali di settore ovvero delle leggi regionali, o ancora dei regolamenti comunali in materia di patrimonio storico, per avere la conferma che i beni culturali immateriali sono considerati e riconosciuti. A titolo esemplificativo vale richiamare la recente legge 8 marzo 2017, n. 44 [10], che estende anche agli elementi italiani inseriti nella Lista Rappresentativa del Patrimonio Culturale Immateriale dell'Unesco, le misure di salvaguardia che la legge n. 77 del 2006 aveva adottato solo per i siti e per i beni materiali patrimonio dell'Unesco⁹[11].

Infine, la salvaguardia di tale genere di beni culturali ha trovato riconoscimento anche nel variegato sistema delle autonomie locali, in quanto la loro molteplicità fa sì che l'individuazione e le connesse misure di valorizzazione debbano essere "naturalmente" di competenza della comunità di cui costituiscono elementi valoriali ed identitari.

⁹ La legge n. 77 del 2006 "Misure speciali di tutela e fruizione dei siti italiani di interesse culturale, paesaggistico e ambientale, inseriti nella Lista del Patrimonio Mondiale, posti sotto la tutela UNESCO", ha visto modificare il suo titolo dall'art. 1, c. 1, lett. o), l. n. 44 del 2017 in "Misure speciali di tutela e fruizione dei siti e degli elementi italiani di interesse culturale, paesaggistico e ambientale, inseriti nella Lista del patrimonio mondiale, posti sotto la tutela UNESCO".

A differenza dell'ordinamento italiano quello spagnolo si distingue per aver adottato, anche ben prima della Convenzione Unesco 2003, una legislazione in materia di patrimonio storico immateriale. Infatti, richiami in questo senso, seppur appena accennati, si rintracciano già nel *Real Decretoley de 9 de agosto de 1926, sobre protección, conservación y acrecentamiento de la riqueza artística*, che contemplava il valore del "típico" e del "pintoresco". Ma è la Costituzione spagnola del 1978 a dotare il patrimonio storico immateriale di un esplicito e fondamentale ancoraggio giuridico "pionero en el contexto constitucional europeo", gettando le basi per il principale riferimento legislativo che ha dato avvio al percorso di tutela dei beni culturali immateriali nell'ordinamento spagnolo: la *Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español*. Si è scelto quindi di svincolare il patrimonio storico dal concetto di materialità legandolo all'importanza della fruizione del bene da parte delle generazioni presenti e future e al suo fondamentale ruolo sociale. La suddivisione tra beni di interesse culturale, beni inclusi nell'inventario generale dei beni mobili e beni aventi più di cento anni realizzato dal Ministero della Cultura spagnolo individua nella prima categoria la più importante includendo al suo interno quei beni per i quali ogni decisione è rimandata alle collettività autonome. L'esportazione di questa tipologia di patrimonio è estremamente vincolata alla definizione di specifici fini e per un tempo limitato. Per quanto concerne le proprietà del privato la normativa spagnola prevede il dovere di conservazione e custodia, l'utilizzo del bene nel rispetto del valore sociale e culturale insito nell'oggetto stesso, e il diritto di prelazione da parte dello Stato in caso di eventuale decisione di cessione del bene. Dunque, secondo Fantini [12], l'ordinamento spagnolo, seppure oggi possa essere preso a riferimento come modello di legislazione organica in materia di patrimonio storico immateriale, tuttavia, si contraddistingue per una interpretazione "centralista" della Convenzione Unesco, contravvenendo a quella *conditio sine qua non* che prevede, per la qualificazione di questo genere di patrimonio storico, la compresenza di tre requisiti: intangibilità; riferibilità; "comunità" "partecipazione comunitaria".

2.2 Principali metodi di valutazione e salvaguardia del patrimonio storico

Compreso il significato di patrimonio storico ed il concetto di salvaguardia ad esso associato, è importante definire in che modo esso viene valutato e salvaguardato. A tal fine, sono state analizzate¹⁰ le principali pubblicazioni scientifiche sul tema.

In generale, nel campo del processo decisionale, le analisi multicriteriali sono diventate uno strumento diffuso in

grado di affrontare problemi che coinvolgono più di un obiettivo.

Difatti, oltre alla possibilità di considerare dati di diversa natura (quantitativi e qualitativi), offrono l'opportunità di assegnare diversi pesi ai criteri identificati, gestire i conflitti tra gli obiettivi e dedurre le priorità tra le alternative.

Negli ultimi decenni, la ricerca scientifica ha proposto un buon numero di metodi e tecniche per effettuare analisi multicriteriali. Alcuni fra i più importanti sono *Weighted Sum Model* (WSM) [13], *Weighted Product Model* (WPM) [14], *Weighted Aggregated Sum Product Assessment* (WASPAS) [15], *Analytical Hierarchy Process* (AHP) [16], *Elimination Et Choix TRaduisant la REalité* (ELECTRE) [17], *Technique for Order of Preference By Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) [18], *Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations* (PROMETHEE) [19], *Complex Proportional Assessment* (COPRAS) [56], *Visekriterijumska Optimizacija i kompromisno Resenje* (VIKOR) [20], *Multiobjective Optimization by Ratio Analysis plus Full Multiplicative Form* (MULTIMOORA) [21] e *Additive Ratio Assessment* (ARAS) [15].

Anche nell'ambito della valutazione del patrimonio storico, è emerso un ampio uso delle analisi di tipo multicriteriale.

L'*Analytic Hierarchy Process* (AHP) è applicata da Ribera et al. [22], Haroun et al. [23] per individuare il *Highest and Best Use* per il patrimonio storico, tenendo conto sia della sua identità sociale, culturale ed economica che della conservazione della sua integrità e immagine originale.

Forte F. et al. [24], partendo dall'analisi delle relazioni tra conservazione e trasformazione del bene architettonico storico, propongono un modello basato su analisi multicriteriale. Anche in questo caso viene applicata l'AHP per la valutazione della natura "vocazionale" dell'immobile "Villa Vesuviana", finalizzato al suo riutilizzo conservativo.

L'AHP è utilizzata congiuntamente con altre metodologie quali l'*Additive Ratio Assessment* anche da Wang et al. [25]. Il fine è quello di determinare la priorità di salvaguardia tra diversi edifici appartenenti al patrimonio storico. Anche Della Spina [26] propone un modello di valutazione basato sull'uso combinato di tre analisi multicriteriali (AHP-MacBeth-EVAMIX) per classificare le strategie di riutilizzo adattivo dei beni culturali inutilizzati e supportare i decisori nell'implementazione di strategie di sviluppo in contesti vulnerabili.

Appiotti et al [27], propongono un modello che include strumenti di valutazione specifici, basati su parametri e indicatori relativi ai fattori di pericolo e vulnerabilità per diversi tipi di rischio. I set multidimensionali di indicatori vengono utilizzati per ottenere indici sintetici, attraverso un approccio multicriteriale. La valutazione è poi supportata da questionari, al fine di attribuire un peso agli indicatori ed al contempo includere nel modello di valutazione l'opinione di diversi esperti e stakeholder.

Oppio et al. [28] applicano la *Spatial Multicriteria Analysis* (SMCA), nell'ottica di fornire supporto in tutte le fasi del

¹⁰ L'analisi delle pubblicazioni è avvenuta attraverso il motore di ricerca bibliografico di Scopus.

[processo decisionale riferito alla conservazione del patrimonio storico. Lo studio si è concentrato sulla prima fase del processo (*intelligence*), con l'obiettivo di definire un quadro analitico multidimensionale, finalizzato alla mappatura del patrimonio storico diffuso con particolare attenzione alle sue caratteristiche territoriali.

Bottero et al. [29] propongono un approccio multicriteriale per classificare le strategie di riutilizzo adattivo del patrimonio storico. In particolare, presentano un'applicazione del *Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations* (PROMETHEE) per supportare la progettazione e l'implementazione di strategie di riuso adattivo del patrimonio storico industriale abbandonato in contesti vulnerabili, e valutare i relativi effetti tangibili e intangibili.

Tornando all'individuazione dell'*Highest Best Use* del patrimonio storico, da Ferretti et al. [30] viene applicata la Teoria del Valore Multi-Attributo (MAVT), un particolare approccio multicriteriale. La MAVT può essere usata per affrontare problemi che coinvolgono un insieme finito e discreto di azioni alternative che devono essere valutate sulla base di obiettivi contrastanti.

Considerando la valutazione del valore sociale del patrimonio storico, da Torrieri et al. [31] viene proposta l'applicazione del *community mapping* ovvero un dispositivo narrativo delle connessioni tra luoghi e persone, attraverso un linguaggio chiaro a tutti: il disegno. È una forma speciale di rappresentazione, basata su un processo partecipativo, che coinvolge gli abitanti di una determinata identità in un esercizio di auto-rappresentazione e riconoscimento del valore locale.

Quando invece si tratta di verificare la fattibilità di un intervento che riguarda il patrimonio storico ed in particolare il recupero di siti archeologici, da Campo et al. [32] viene proposta l'applicazione del *Weighed Sum Model*, che appartiene ai cosiddetti metodi multicriteriali di "*outranking*" (insieme a ELECTRE, EVAMIX, TOPSIS). Utilizzando il "sistema relazionale sintetizzante le preferenze", classifica le alternative attraverso la costruzione di relazioni binarie tra di esse.

Da Salvo et al. [33], sono stati applicati due dei metodi caratteristici della *Real Estate Evaluation*, ovvero il *market approach* ed il *cost approach* per determinare il valore di mercato del patrimonio storico.

Forte et al. [34], sempre considerando l'ambito del *cultural heritage*, evidenziano le caratteristiche e i diversi valori, definendo, in modo sistematico, il danno causato da eventi sismici e suggerendo i principali metodi per la valutazione.

Dall'analisi della principale letteratura scientifica con applicazioni di analisi multicriteriali a problemi decisionali riguardanti i beni culturali, emerge l'importanza dell'uso di metodologie combinate, particolarmente utili per affrontare situazioni complesse e capaci di strutturare processi decisionali più inclusivi e volti a una maggiore condivisione delle scelte [35].

A seconda del metodo e alla procedura adottata per rivelare la preferenza del decisore, le analisi multicriteriali possono essere così classificate:

- Metodi di *outranking*: impiegano una procedura basata sulla costruzione di relazioni binarie (per lo più discordanza e concordanza) tra coppie di elementi. Tra questi i più noti sono i metodi ELECTRE e PROMETHEE.
- Metodi di aggregazione completa: ad ogni criterio viene assegnato un peso. In seguito, è previsto il calcolo di un punteggio numerico per ogni alternativa e quella con il punteggio più alto prevale (per esempio, AHP).
- Metodi di obiettivo, aspirazione o livello di riferimento: questi metodi identificano quanto è lontana ogni alternativa dall'obiettivo o dall'aspirazione ideale (per esempio, TOPSIS).

Come già illustrato, le tecniche di analisi multicriteri sono molteplici e la scelta di quale metodo adottare non è mai banale. I passaggi successivi propongono un approfondimento su alcune specifiche tecniche che, sulla base dell'analisi della letteratura, si sono rivelate particolarmente efficaci nel contesto della valutazione del patrimonio storico¹¹. Ciò, al fine di identificare l'analisi che potrebbe essere più adeguata alla risoluzione del problema decisionale in questione.

Si inizia l'approfondimento a partire dai metodi *outranking* ed in particolare dai metodi ELECTRE¹². (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*) che consistono nella cosiddetta relazione di surclassamento.

Le due procedure principali caratterizzanti ELECTRE sono:

- a) procedura di aggregazione a criteri multipli che costruisce una o più relazioni di *outranking* al fine di confrontare ogni coppia di alternative in modo completo;
- b) procedura di *exploitation* che può fornire risultati in base a come il problema viene affrontato, scegliendo, classificando o ordinando.

I metodi ELECTRE consentono di evitare la compensazione tra criteri e qualsiasi processo di normalizzazione, che distorce i dati originali. Lo svantaggio è che richiedono vari parametri tecnici, non sempre di facile lettura.

Sempre nell'ambito dei metodi *outranking* vi è PROMETHEE "*Preference Ranking Organization METHods for Enrichment Evaluations*," che si basa su confronto a coppie tra le alternative, dove la preferenza del *decision-maker* è definita in funzione della distanza tra due ipotetiche alternative, per ogni singolo criterio.

Il metodo PROMETHEE permette di operare direttamente sulle variabili incluse nella matrice di decisione senza ri-

¹¹ A seguito dei risultati dell'indagine della letteratura precedentemente effettuata, i principali metodi ricorrentemente utilizzati risultano essere: AHP, TOPSIS, ELECTRE e PROMETHEE.

¹² La famiglia dei metodi ELECTRE comprende le tecniche ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE IV, ELECTRE TRI, ELECTRE IS.

chiedere alcuna normalizzazione ed è applicabile anche quando le informazioni sono insufficienti. Tuttavia, quando vi sono numerosi criteri coinvolti, lo sviluppo del metodo diventa complesso, rendendo difficile per i decisori avere un quadro chiaro del problema.

Per quanto riguarda la "*Technique for Order Preferences by Similarity to an Ideal Solution*", (TOPSIS), l'idea alla base di questo metodo consiste nello scegliere, come migliore alternativa, quella che si trova più vicino alla soluzione ottimale e più distante dalla soluzione peggiore. Ogni alternativa viene rappresentata da un vettore, i cui elementi descrivono la performance dell'alternativa per ogni criterio decisionale.

Pertanto, la soluzione migliore risulta essere quella che massimizza la performance per i criteri associati a un beneficio (*output*) e minimizza la performance per i criteri associati a un costo (*input*). Il vantaggio di questo metodo è che richiede solo pochi input da parte del decisore e il suo output è facile da capire. Tuttavia, nel caso in cui si presentino problemi multidimensionali, è necessario ricorrere alla normalizzazione vettoriale, rendendo particolarmente complesso il processo decisionale.

Per concludere l'approfondimento, di seguito si sottolineano i principali aspetti che hanno portato al ricorso dell'*Analytic Hierarchy Process (AHP)* per lo sviluppo del caso studio.

L'AHP delinea una procedura per la scomposizione di problemi rappresentabili in maniera gerarchica. Attraverso l'esplicitazione di tutti i valori in gioco, il metodo permette una più completa conoscenza del problema decisionale che si vuole risolvere; inoltre consente la partecipazione dei diversi attori interessati e la mediazione dei possibili conflitti.

Ulteriore caratteristica di questo sistema di valutazione riguarda a) la possibilità, per i(l) decisori(e), di legittimare la scelta, grazie alla verifica *consistency index* e b) la semplicità con la quale viene impostato il problema decisionale.

Aspetto, quest'ultimo, non trascurabile, considerata la complessa struttura amministrativa caratterizzante contesto di riferimento che necessariamente doveva essere coinvolta nel processo decisionale¹³.

Inoltre, così come accennato nella parte introduttiva, per meglio affrontare il problema in esame¹⁴, l'applicazione dell'*Analytic Hierarchy Process* è stata combinata ad altre procedure di valutazione, illustrate attraverso lo schema in figura 3.

¹³ Il patronato dell'Alhambra e Generalife coordina direttamente tutte le attività riguardanti i processi di restauro e manutenzione dei complessi monumentali costituenti l'Alhambra (tra cui il *Patio de los Leones*).

¹⁴ Gerarchizzazione delle 124 colonne del *Patio de los Leones* in funzione dell'urgenza di restauro.

3. MATERIALI E METODI

3.1 Definizione dello stato di conservazione del colonnato

Il processo di studio dello stato di conservazione del colonnato del *Patio de los Leones* è stato condotto nell'ambito dell'attività del progetto WARMEST. Da ciò è derivata l'opportunità di collaborare con i membri del progetto, con un continuo scambio di conoscenze. Ciò, ha permesso di espletare in maniera ottimale tutte le fasi riguardanti lo studio di conservazione che richiedono un ampio spettro di conoscenza in diverse discipline. Le fasi che hanno caratterizzato lo studio dello stato di conservazione del colonnato¹⁵, sono state le seguenti:

1) *Analisi delle tecnologie e degli strumenti utilizzati per il rilievo del patrimonio storico.*

Dall'analisi della letteratura, è emerso che tra le tecniche più frequentemente utilizzate sono la *Structure from Motion*¹⁶ (SfM) terrestre¹⁷ o area¹⁸, il rilievo con strumentazione LIDAR¹⁹, o attraverso indagini termografiche²⁰ eseguite con camera IR e strumento di rilevazione.

La selezione dello strumento/tecnica più adeguata all'ambito di indagine è stata influenzata da due principali fattori. Il primo, di carattere normativo, ha riguardato le limitazioni all'autorizzazione al volo a cui sono soggetti i droni all'interno del territorio spagnolo. La necessità di ricevere la suddetta autorizzazione ogni qual volta fosse stato necessario compiere il rilievo, ha portato il gruppo di lavoro alla scelta di applicare la

¹⁵ e generalmente valide per lo studio dello stato di conservazione del patrimonio storico

¹⁶ Lo SfM fa parte delle tecniche fotogrammetriche e la sua peculiarità consiste nella modalità di scatto delle fotografie. L'oggetto 3d viene generato infatti da fotografie che riprendono un oggetto da vari punti di vista e angoli di rotazione.

¹⁷ Prevede l'utilizzo di fotocamere digitali

¹⁸ Consiste nell'utilizzo di strumentazione UAV (droni) integrata con fotocamera digitale.

¹⁹ La tecnica in questione permette di acquisire immagini e dati dimensionali dall'oggetto da rilevare ad alta velocità e in poco tempo, compiendo una scansione dell'oggetto da rilevare e creando direttamente una nuvola di punti. Gli strumenti utilizzati per la scansione laser hanno un campo visivo simile a quello degli occhi umani e possono essere controllati da remoto dal computer se integrati con sistema GPS.

Tra gli strumenti che permettono di effettuare il laser scanning vi è il *Light detection and ranging* (LIDAR) che fu introdotto per la prima volta dalla NASA nel 1970. Il LIDAR in fase di esercizio effettua una vera e propria scansione dell'oggetto di interesse, colpendolo con un impulso laser. La scansione avverrà seguendo uno schema a strisce e l'insieme delle strisce scansionate darà origine alla nuvola di punti dell'oggetto in esame.

²⁰ L'indagine termografica consente di ricavare un'immagine radiometrica in funzione dell'immagine ad infrarossi acquisita. In ogni punto dell'immagine radiometrica ottenuta è possibile conoscere la temperatura grazie all'elaborazione di complessi algoritmi.

tecnica dello SfM per via terrestre, avvalendosi di fotocamere digitali. Il secondo fattore che ha ancor di più avallato la scelta di applicazione dello SfM terrestre è stata la possibilità di ripetere agevolmente il rilievo nel tempo, alla luce della reperibilità ed economicità degli strumenti utilizzati.

2) Rilievo delle colonne del Patio de los Leones.

Il processo di rilievo è avvenuto dunque attraverso lo SfM, che ha permesso di espletare il rilievo geometrico. L'indagine termografica inoltre ha consentito di ottenere informazioni riguardanti le caratteristiche fisiche di ciascuna colonna con particolare riferimento ai degradi presenti.

3) Studio del materiale che caratterizza le colonne.

Dallo studio della letteratura a disposizione, nonché dal contributo di esperti chimici e restauratori²¹, è emerso come il marmo di Macael²² non sia un materiale ideale in termini di durabilità, a causa delle sue caratteristiche endogene quali anisotropia, tessitura e struttura.

4) Descrizione dei fattori che causano il degrado sulle colonne.

Definite le principali caratteristiche del materiale, è stato possibile comprendere meglio quali siano i fattori che ne causano il degrado. Occorre in questo senso effettuare una distinzione. Il processo di degrado e alterazione è attivato principalmente da fattori esogeni, di natura fisica, chimica e/o biologica e antropica che agiscono sinergicamente tra loro. La risposta del materiale all'attacco di questi agenti dipende, invece, da fattori endogeni, quindi dal tipo di roccia, dalla sua origine, composizione, tessitura e struttura.

È fondamentale considerare contemporaneamente questi due fattori, per non incorrere in errori di valutazione sullo stato di alterazione e sulle cause che accelerano il processo di degrado.

Nel caso specifico, i fattori endogeni corrispondono alle caratteristiche, analizzate nella fase precedente, del marmo di Macael che costituisce le colonne. Per quanto riguarda i fattori di natura esogena sono invece da individuare nel contesto del Patio.

A questo proposito sono state raccolte informazioni riguardanti il clima (ore di irraggiamento annuale, dati pluviometrici, principali direzioni del vento), il flusso turistico ed eventi sismici.

Sono stati individuati 7 principali fattori che causano il degrado delle colonne [36].

Per ciascuno è indicato in tabella 1 l'azione meccanica

e la descrizione di come il degrado si manifesta visivamente²³[37].

Tabella 1 - Correlazione tra fattori, meccanismi e indicatori visivi secondo raccomandazioni UNI EN 1182/2006

Fattore n.	Azione Meccanica	Manifestazione visiva
1) Radiazione solare	Dilatazione termica	Rigonfiamento-Foliazione-Distaccamento
2) Pioggia	Imbibizione-Azione meccanica	Efflorescenza - Distaccamento - Pitting
3) Presenza di sale	Azione meccanica	Efflorescenza - Distaccamento
4) Terremoti e vibrazioni	Azione meccanica	Fessurazioni
5) Agenti biologici	Attacchi biologici	Patina biologica
6) Gelo	Azione meccanica	Pitting, Distaccamento, Fessurazione
7) Uso del monumento	Azione meccanica	Rigature/Graffi, Fratturazioni

5) Diagnosi del degrado delle colonne:

Per la diagnosi dello stato delle singole colonne, è stata fondamentale l'analisi della letteratura dalla quale sono emersi dati specifici riguardo i degradi del Patio de los Leones e la loro evoluzione nel corso del tempo. Sono stati individuati 3 studi risalenti rispettivamente al 1989, al 2004 ed al 2012 che trattano la questione.

Nel 1989, Galán Huertos, pur non descrivendo quali degradi interessassero le varie colonne, definì una scala per determinarne il livello di alterazione. Tale scala permette di operare una diagnosi quantitativa, ovvero il livello di alterazione viene quantizzato in relazione alla mancanza di materiale (sotto forma di distaccamento o pitting) che interessa il fusto della colonna (Fig. 1).

Figura 1 - Scala livello di alterazione delle colonne di Galan Huertos (Fonte 1).

²¹ Al fine di avere un solido riscontro scientifico, la Professoressa Anna Arizzi, del Dipartimento di Mineralogia e Petrologia dell'Università di Granada, ha fornito il proprio contributo a questa fase della ricerca.

²² Materiale che costituisce le colonne.

²³ Seguendo quanto descritto dalle raccomandazioni UNI EN 1182/2006 – Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei.

La scala ha un andamento crescente dal livello di alterazione (LA) più basso (T1) al più alto (T8):

- LA - T1 condizioni inalterate;
- LA - T2 stato iniziale di alterazione con distaccamenti di forma circolare di diametro compreso tra circa 0,5 cm e 5 cm;
- LA - T3 distaccamenti di forma circolare particolarmente diffusi sul fusto della colonna o in stadio avanzato e di diametro solitamente compreso tra i 5 e i 10 cm;
- LA - T4 distaccamenti di forma irregolare di larghezza compresa tra i 10 e i 15 cm e lunghezza da 1 a 1,5 cm;
- LA - T5 distaccamenti di forma irregolare di larghezza compresa tra i 15 e i 20 cm e lunghezza da 1 a 2 cm;
- LA - T6 distaccamenti di larghezza superiore ai 20 cm che interessano diffusamente il fusto della colonna;
- LA - T7 distaccamento di larghezza superiore ai 20 cm con iniziale processo di erosione della colonna;
- LA - T8 la colonna presenta *pitting* diffuso su gran parte della sua superficie.

Sempre Galán Huertos, raggruppò i livelli secondo una scala di tipo qualitativo:

- Livello di Alterazione Basso: da T1 a T2
- Livello di Alterazione Medio: da T3 a T4
- Livello di Alterazione Alto: da T5 a T6
- Livello di Alterazione Estremo: da T7 a T8

Dopo il 1989, lo stato di conservazione delle colonne è stato monitorato nuovamente da Saez-Perez nel 2004 e nel 2012.

Considerando l'obiettivo della ricerca, l'aggiornamento²⁴ del livello di alterazione è risultato imprescindibile. A tal fine, a seguito dei rilievi effettuati e sopra descritti, è stata definita la mappa dei degradi e del livello di alterazione del colonnato, rappresentata in figura 2.

²⁴ Aggiornamento all'epoca della ricerca, anno 2020.

²⁵ Tale procedura deve essere eseguita per ognuna delle 124 colonne del *Patio de los Leones*.

Figura 2 - Mappa livello di alterazione e degradi del colonnato.

3.2 Procedura di valutazione integrata per la salvaguardia del colonnato del Patio de los Leones

La procedura metodologica²⁵, schematizzata in figura 3, seppur ispirata dalle esigenze manifestate dal responsabile tecnico del *Patio de los Leones*, può essere riprodotta e applicata ad altri beni del patrimonio storico aventi caratteristiche tipologiche e costruttive simili al colonnato in esame.

All'apice del processo (fig. 3) vi è la creazione di un modello HBIM del bene oggetto d'esame, ove inserire tutte le informazioni disponibili per ogni singola colonna^[38], rendendo così l'archiviazione dei dati compatibile alle tecnologie ultimamente utilizzate per il *management* dei beni culturali.

La fase di identificazione del degrado è avvenuta attraverso la verifica di una eventuale perdita di materiale dalla superficie²⁶, così come definito dalla UNI EN 1182/2006.

Nel caso in cui la colonna in esame è caratterizzata da de-

gradi che non comportino perdita di materiale, sono stati definiti interventi di pulitura idonei alle caratteristiche del marmo di *Macael*.

Se invece vi è perdita di materiale dalla superficie della colonna, si è valutata la variazione del livello di alterazione nel corso del tempo²⁷.

In tal senso sono stati considerati cinque diverse casistiche:

1) *Livello di alterazione invariato nel corso del tempo*: per queste colonne è necessario valutare il livello di alterazione attuale. Nel caso in cui questo è rimasto invariato a livelli alti (T5-T6) o estremi (T7-T8), si procede con il calcolo dell'indice di vulnerabilità della colonna rispetto ad ognuno dei fattori esogeni individuati. Nel caso in cui il valore medio dell'indice non supera la soglia²⁸ ($I_{vx} \geq 2$), i dati relativi alla colonna sono inseriti

²⁶ Le diciture "degradi che comportano perdita di materiale" e "degradi che non comportano perdita di materiale" derivano dalla UNI EN 1182/2006.

²⁷ La cadenza temporale dipenderà dai dati a disposizione. Nel caso del *Patio de los Leones*, ad esempio, le informazioni relative al livello di alterazione sono state aggiornate circa ogni 7 anni a partire dal 1989.

²⁸ A seguito dell'analisi della letteratura esistente, si ritiene fissare come soglia, oltre la quale il valore dell'indice di vulnerabilità non è più trascurabile, $I_{vx} \text{ medio} > 2$. La definizione di tale indice è trattata al paragrafo 3.3.

Figura 3 - Procedura metodologica per la salvaguardia del colonnato.

all'interno del modello HBIM ma l'intervento di restauro può essere rimandato ad una tempistica successiva²⁹. Se invece tale valore soglia viene superato è prevista la definizione della priorità di intervento di restauro, attraverso l'applicazione dell'*Analytic Hierarchy Process*.

- 2) *Livello di alterazione variato da basso (T1-T2) a medio (T3-T4)*: in questo caso è previsto un monitoraggio annuale dello stato di alterazione.
- 3) *Livello di alterazione della colonna variato da medio (T3-T4) ad alto (T5-T6)*: è necessario procedere con il calcolo dell'indice di vulnerabilità della colonna ed eventualmente stabilire la priorità di intervento di restauro, attenendosi alla stessa procedura descritta al punto 1).
- 4) *Livello di alterazione della colonna variato da alto (T5-T6) ad estremo (T7-T8)*: anche in questo caso, il processo prevede le stesse fasi cui al punto 1) e 3).
- 5) *Livello di alterazione migliorato a seguito di interventi di restauro*: per le colonne già sottoposte ad intervento di restauro, si prescrive il monitoraggio del livello di alterazione a distanza triennale.

3.3 Definizione indice di vulnerabilità della colonna

Al fine di definire un indice che rifletta la vulnerabilità dell'elemento considerato, è stato condotto uno studio sia riguardo la definizione di vulnerabilità riferita al patrimonio storico che degli indici utilizzati per quantificarla.

Numerosi autori, tra cui Livraghi et al. [39], Italia et al. [40], Francini et al. [41] e Lazzeri [42], concordano nel definire la vulnerabilità come una caratteristica intrinseca di tale patrimonio, e "che esprime la propensione di un qualsiasi elemento esposto (p. es. edifici, manufatti architettonici e archeologici) ad essere danneggiato o a degradarsi a causa di un agente esterno connesso alle condizioni di pericolosità ambientale o antropica".

Nel caso in cui si debba determinare la vulnerabilità del patrimonio storico, gli autori procedono con il calcolo di un indice di Vulnerabilità Teorica (IVT), la cui stima è effettuata considerando "l'estensione dell'effetto dannoso di un certo evento pericoloso sull'elemento strutturale considerato, nell'ipotesi che questo sia interessato già da un determinato tipo di danneggiamento" [42].

Alla luce di quanto emerso dall'analisi della letteratura si può evincere come l'indice di vulnerabilità, calcolato solitamente per il patrimonio storico, sia di tipo statico ovvero tenga conto dello stato di fatto (danno esistente) dell'elemento considerato.

L'intenzione è stata qui invece di definire un indice di vulnerabilità che tenga in considerazione il rischio di evoluzione del degrado già esistente, a seguito dell'azione dei fattori esogeni e della morfologia dell'elemento tecnico.

Successivamente, seguendo la metodologia proposta, sono sottoposti a gerarchizzazione tutti gli elementi il cui 2, valore oltre il quale, come definito in letteratura, l'indice di vulnerabilità non è più trascurabile.

Di seguito l'indice messo a punto.

$$Iv_x = \frac{\sum_{i=1}^n Dp_i \times \sum_{j=1}^m Ip_j}{m} \quad (1)$$

Dove:

- Iv_x è l'indice di vulnerabilità dell'elemento tecnico x ;
- Ip_j è l'indice di pericolo j -esimo di degrado dell'elemento tecnico in funzione degli m fattori esogeni, relativi al campo di indagine specifico, con valori compresi tra 0 a 1 attribuiti appositamente da esperti.
- $Dp_i = \sum_{i=1}^n d_i \beta_x \times CC_j^k$ è il danno potenziato rispetto all' m -esimo fattore esogeno in cui:
 - d_i è il valore degli n degni che possono interessare l'elemento tecnico, in funzione del materiale da cui è composto. Tale valore è compreso tra 0 a 1 ed è anche in questo caso determinato da esperti della materia.
 - β_x è una variabile *dummy* relativa all' x -esimo elemento tecnico per evidenziare o meno la presenza di ciascun degrado (d_i).
 - CC_j coefficienti correttivi; CC_j assumono valori 1 o 2 in base all'impatto degli m -esimi fattori esogeni, sull'elemento x .

Tale impatto dipende da specifiche caratteristiche morfologiche e di localizzazione dell'elemento x rispetto al contesto.

Data la definizione di tutti i termini che compongono Iv_x , di seguito si tratta riguardo l'applicazione di tale indice alle colonne del *Patio de los Leones*.

Come illustrato in precedenza, i valori dell'indice di pericolo Ip_j sono stati attribuiti a seguito della consultazione di esperti.

Tramite un questionario apposito, è stato chiesto loro di fornire un giudizio riguardo l'indice di pericolo di ognuno dei fattori esogeni individuati, rispetto al degrado delle colonne. Il questionario è stato creato attraverso i moduli di *Google* e strutturato in sette domande³⁰. Gli esperti sono stati selezionati in funzione alle competenze ed in particolar modo, considerando le pubblicazioni scientifiche attinenti alle materie oggetto di indagine.

Per la ricerca di pubblicazioni scientifiche, si è usufruito dei motori di ricerca dei database bibliografici che raccolgono pubblicazioni scientifiche di vari settori disciplinari. All'interno di tali motori di ricerca sono state inserite key-

²⁹ Considerando che il livello di alterazione pur essendo rimasto invariato si attesta su livelli alti o estremi, si prescrive un monitoraggio semestrale per accertare eventuali variazioni dello stato dell'arte.

³⁰ Una domanda per ogni fattore individuato (7).

words riguardanti l'ambito di indagine quali *Macael marble*, e *Macael marble columns decay*.

Seguendo la procedura descritta, sono stati selezionati circa 80 esperti³¹ e, ad ognuno di essi, è stato inviato via mail il questionario.

Attraverso l'analisi delle risposte al questionario è stato quantificato, in termini numerici³², l'indice di pericolo dei fattori esogeni rispetto al degrado della colonna, come mostrato in tabella 3.

Avendo identificato 7 fattori esogeni, il pedice j di I_p varierà da 1 a 7.

Per quanto riguarda il danno potenziato, $Dp_i = \sum_{i=1}^n d_i \beta_x \times CC_{j=1}^k$ si mostra di seguito la procedura di calcolo e attribuzione dei valori.

Iniziando con il pedice d_i , varia da 1 a 6 in quanto sono state identificate sei tipologie di degrado³³.

Anche per l'attribuzione dei valori di $d_1, d_2, \dots, d_6$ è stato richiesto il parere di esperti³⁴, consultati attraverso questionario.

³¹ Le risposte pervenute sono state 62.

³² Agli esperti è stata fornita una scala di giudizio da 1 a 9 in funzione dell'impatto che ha il fattore esogeno considerato sul degrado delle colonne (punteggio da 1 a 2 impatto estremamente basso; da 3 a 4 impatto basso; da 5 a 6 medio; da 7 a 8 alto; 9 estremo).

³³ d1 Foliazione; d2 Fessurazione; d3 Patina; d4 Rigature/Graffi; d5 Distaccamento; d6 Fratturazioni.

³⁴ Gli esperti hanno attribuito un valore compreso da 0 - trascurabile a 1 - estremo, all'impatto che ogni fattore esogeno considerato ha sui sei degradi individuati.

In tal modo è stato possibile compilare la tabella 4.

La variabile *dummy* β_x ha invece la funzione di indicare i degradi di che interessano o meno la colonna x .

Infine, sono stati codificati otto coefficienti correttivi CC_j , relativi alle caratteristiche morfologiche e di localizzazione della colonna:

- $CC1$: esposizione della colonna rispetto ai punti cardinali;
- $CC2$: localizzazione colonna rispetto ad area di vulnerabilità strutturale³⁵;
- $CC3$: localizzazione colonna rispetto ad area di vulnerabilità antropica³⁶;
- $CC4$: tipologia di basamento della colonna (presenza o assenza di basamento) (Fig. 4);

Figura 4 - Tipologia basamento colonne.

³⁵ Con riferimento alla struttura del patio è stata elaborata una mappa che individua 2 diverse aree dove, in caso di azione da sisma, la colonna può subire o meno un danno maggiore.

³⁶ Sono state individuate 3 aree in relazione al percorso che devono seguire i turisti attorno al patio, in cui la colonna è poco, mediamente o molto esposta agli effetti (tocco, graffio, colpo accidentale o volontario ecc.) del loro passaggio.

Tabella 3 - Valore indice di pericolo dei fattori esogeni considerati (Caso studio del Patio de los Leones)

Codice n.	1	2	3	4	5	6	7
Fattore esogeno	Radiazione solare	Pioggia	Presenza di sale	Terremoti e vibrazioni	Agenti biologici	Gelo	Uso del monumento
I_p	0.8	0.4	0.7	0.4	0.2	0.5	0.8

Tabella 4 - Valori da attribuire ai degradi in funzione dei fattori esogeni considerati (Caso studio del Patio de los Leones)

Degradi	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5	n. 6	n. 7
Fattori esogeni	Radiazione solare	Pioggia	Presenza di sale	Terremoti e vibrazioni	Agenti biologici	Gelo	Uso del monumento
Foliazione (d_1)	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4
Fessurazione (d_2)	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1
Patina (d_3)	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
Rigature/Graffi (d_4)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
Distaccamento (d_5)	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3
Distaccamento (d_6)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2

- CC5: tipologia di colonna (singole, doppie, triple o quaduple) (Fig. 5);

Figura 5 - Tipologia colonne.

- CC6: tipologia di congiunzione tronco-capitello con o senza soluzione di continuità (Fig. 6);

Figura 6 - Tipologia congiunzione tronco-capitello.

- CC7: localizzazione degrado su faccia colonna (interna-esterna-destra-sinistra) (Fig. 7);

Figura 7 - Schematizzazione faccia colonna.

- CC8: localizzazione degrado su fusto colonna (terzo inferiore, terzo medio, terzo superiore) (Fig. 8).

Figura 8 - Schematizzazione fusto colonna.

Di seguito, per ogni colonna, viene motivata la scelta di attribuire valore 2 ai vari coefficienti correttivi CC_j . La scelta è stata effettuata in base all'impatto dei singoli fattori esogeni sulla colonna, considerando la sua morfologia e la sua localizzazione.

- *Fattore esogeno n. 1, radiazione solare*: la radiazione solare impatta in maniera diversa su ciascuna colonna in funzione della localizzazione rispetto ai punti cardinali; quindi, in funzione alla colonna considerata, il fattore esogeno n. 1 può determinare che i coefficienti correttivi CC_1 e CC_7 assumano valore 2.
- *Fattore esogeno n. 2, pioggia*: Anche l'acqua piovana ha un impatto diverso su ognuno degli elementi considerati. Ad esempio, una colonna senza basamento è più soggetta al fenomeno di risalita dell'acqua per capillarità. Inoltre, in caso di combinazione di pioggia-vento, vi sono determinati prospetti più colpiti³⁷. Quindi, in funzione alla colonna considerata, il fattore esogeno n. 2 può determinare che i coefficienti correttivi CC_1 e CC_4 assumano valore 2.
- *Fattore esogeno n. 3, presenza di sale*: come osservato in fase di trattazione del paragrafo 3.1, la superficie delle colonne più esposte alla pioggia risulta essere maggiormente caratterizzata dalla presenza dei sali disciolti dall'acqua.
- *Fattore esogeno n. 4, terremoti e vibrazioni*: la presenza o l'assenza di basamento, la tipologia di congiunzione tronco-capitello, la tipologia di colonne (singola, doppia tripla o quadrupla) e la localizzazione nelle aree definite più vulnerabili dal punto di vista strutturale, sono tutte caratteristiche che influenzano il comportamento della colonna in caso di terremoti o vibrazioni.

Quindi, in funzione alla colonna considerata, il fattore esogeno n. 4 può determinare che i coefficienti correttivi CC_2 , CC_4 , CC_5 , CC_6 assumano valore 2.

- *Fattore esogeno n. 5, agenti biologici*: la proliferazione sulla superficie della colonna di agenti biologici, con particolare riferimento a microrganismi vegetali, sarà favorita da determinate condizioni termo-igrometriche. Le colonne più soggette alla proliferazione di tali agenti apparterranno quindi ai prospetti che ricevono più pioggia e sono esposte meno ore alla radiazione solare. Quindi, in funzione alla colonna considerata, il fattore esogeno n. 5 può determinare che il coefficiente correttivo CC_1 assumo valore 2.
- *Fattore esogeno n. 6, gelo*: le colonne che durante il giorno ricevono meno ore di esposizione alla radia-

³⁷ A tal proposito, al paragrafo 3.1.4, è stata studiata la direzione del vento e quali prospetti, in caso di combinazione con pioggia, sono maggiormente esposti.

zione solare e che sono più colpite dall'acqua piovana sono sicuramente tra le più esposte al verificarsi del fenomeno del gelo. Quindi, in funzione alla colonna considerata, il fattore esogeno n. 3 può determinare che il coefficiente correttivo CC_1 assuma valore 2.

- *Fattore esogeno n. 7, uso del monumento*: i degradi, in relazione alla localizzazione sul fusto della colonna, potrebbero risentire maggiormente di un colpo accidentale o di atti vandalici.

Dunque, i coefficienti correttivi individuati sono stati il $CC3$ (localizzazione colonna rispetto ad area vulnerabilità antropica) e $CC8$ (localizzazione degrado su fusto colonna).

Al fine di avere un quadro d'insieme chiaro, è stata elaborata la tabella 5 che mostra per ogni fattore esogeno, quale coefficiente correttivo scegliere.

Come detto in precedenza, per le colonne il cui Iv_x risulta maggiore di 2, si procederà quindi con la gerarchizzazione in funzione dell'urgenza dell'intervento di restauro.

3.4 Analisi multicriteriali per la definizione della priorità di intervento

Le analisi multicriteriali supportano il decisore qualora si trovi a operare con valutazioni numerose e conflittuali, consentendo di ottenere una soluzione di compromesso in modo trasparente [43]. Dall'analisi della letteratura è emerso chiaramente come esse rappresentino un valido supporto in scelte che riguardano il patrimonio storico. L'ultimo tassello del processo metodologico messo a punto, prevede quindi l'applicazione di un'analisi multicriteriale ed in particolare dell'*Analytic Hierarchy Process* che si rivela particolarmente efficace quando è necessario determinare una priorità tra un insieme finito e discreto di alternative.

Considerando il caso studio è stato definito un problema su tre livelli:

- *Livello 1*: obiettivo generale della valutazione (gerarchizzazione delle colonne in funzione dell'urgenza di restauro).

Tabella 5 - Scelta dei coefficienti correttivi in funzione dei fattori esogeni considerati (Caso del Patio de los Leones)

CC	Radiazione solare	Pioggia	Presenza di sale	Terremoti e vibrazioni	Agenti biologici	Gelo	Uso del monumento
Fattori esogeni							
CC1 - esposizione colonna rispetto a punti cardinali	X	X	X		X	X	
CC2 - localizzazione colonna rispetto ad area di vulnerabilità strutturale				X			
CC3 - localizzazione colonna rispetto ad area di vulnerabilità antropica							X
CC4 - tipologia basamento		X		X			
CC5 - tipologia di colonna				X			
CC6 - tipologia di congiunzione tronco/capitello				X			
CC7 - localizzazione degrado di faccia colonna	X						
CC8 - localizzazione degrado su fusto colonna							X

– Livello 2: criteri di valutazione (fattori esogeni responsabili del degrado del materiale).

– Livello 3: alternative oggetto di valutazione (colonne con $Iv_x \geq 2$).

Le alternative (colonne) saranno dunque gerarchizzate in funzione di un set di criteri (fattori esogeni che causano il degrado delle colonne).

Al fine di garantire un giudizio oggettivo per l'attribuzione di un grado di preferenza tra i criteri, il solo parere del decisore può risultare insufficiente. Per questo motivo l'AHP è spesso coadiuvato da altri metodi o strumenti *ad hoc* per la valutazione del grado di preferenza. In questo caso, è stato ritenuto opportuno avvalersi del giudizio di esperti del campo di studio. Una volta acquisito tale giudizio viene attribuito un peso ad ogni criterio, utilizzando la scala di Saaty, e successivamente si procede con il calcolo del vettore priorità dei criteri.

3.5 Gestione dati attraverso modello HBIM

Come specificato in precedenza, all'origine del processo di salvaguardia delle colonne vi è la creazione di un modello *Heritage-BIM* (HBIM) del bene oggetto d'esame ove vengono implementati tutti i dati a disposizione per ogni colonna.

La creazione di tale modello rappresenta un percorso di conoscenza critica, dove temi essenziali sono la trasparenza delle informazioni e la sua attendibilità.

L'HBIM, come sottolineato da Moyano et al. [44], si pone come elemento innovativo rispetto ai tradizionali metodi di gestione, catalogazione e valorizzazione del patrimonio storico, in quanto permette di memorizzare dati geometrici e documentali insieme, ottenendo modelli facilmente consultabili. Si evita così ridondanza delle informazioni e dispersione dei dati, permettendo una più consapevole valorizzazione del patrimonio.

Il modello, al fine di essere informatizzato, viene creato sfruttando gli elementi per la modellazione architettonica

disponibili all'interno delle famiglie³⁸ che caratterizzano i diversi *Authoring Software* che permettono di progettare in BIM.

Considerando il caso studio, l'obiettivo è creare una scheda tecnica *ad hoc* collegata ad ogni colonna, in modo tale da soddisfare i requisiti per il raggiungimento del LoD G³⁹. All'interno della scheda tecnica, oltre ai parametri già presenti di default quali localizzazione, materiale, esposizione, ven-

³⁸ Quest'ultime sono definite come un "gruppo di elementi con un insieme di proprietà comuni denominate parametri ed una rappresentazione grafica associata". La loro organizzazione è suddivisa in due macro categorie principali dette rispettivamente di sistema e caricabili. Le famiglie di sistema comprendono tutti gli elementi di base normalmente utilizzati in un processo costruttivo che sono personalizzabili entro certi limiti preimpostati dal software. Le famiglie caricabili invece, non sono presenti di default nell'ambiente di progetto ma possono essere caricate da librerie esterne. Anch'esse sono personalizzabili in termini di forma, composizione, aspetto e parametrizzazione dell'oggetto. Nel caso in questione si farà uso delle famiglie di sistema.

³⁹ L'AIA (*American Institute of Architects*) ha introdotto il concetto di LOD, *Level Of Development*. I LOD permettono quindi di stabilire la reale affidabilità delle informazioni inserite in un modello digitale. Nella norma G202-2013, *Building Information Model Protocol Form* elaborata dall'AIA i vari livelli LOD sono suddivisi in questo modo: LOD 100, LOD 200, LOD 300, LOD 350, LOD 400 e LOD 500 a seconda del crescente valore informativo e geometrico che si conferisce all'elemento.

Anche la normativa italiana dà una definizione ai vari livelli di dettaglio nella parte 4 della norma UNI 11337-4 sulla falsa riga della normativa americana. In particolare, la norma UNI fa una distinzione di LOD (che in questo caso viene definito come Livello di Sviluppo di un oggetto digitale) per interventi di nuova costruzione o di restauro. Per gli Interventi di nuova costruzione abbiamo sette livelli di LOD che vanno da A a G a seconda del livello informativo e geometrico dell'elemento.

Figura 9 - Scheda tecnica Autodesk Revit con creazione di parametri condivisi.

gono creati nuovi parametri condivisi relativi alle caratteristiche strutturali, allo stato di conservazione, al valore degli indici di vulnerabilità per ogni fattore esogeno ed infine alla posizione in gerarchia d'intervento (Fig. 9).

4. RISULTATI

Il processo di salvaguardia messo a punto e illustrato in figura 3, è stato applicato al caso studio, ovvero alle colonne del *Patio de Los Leones*. Una volta creato il modello HBIM del bene, il processo di informatizzazione vero e proprio è stato conseguente all'analisi di ogni colonna, descritta nel corso dei seguenti paragrafi.

4.1 Valutazione e gestione di colonne con tipologia di degrado che non comporta perdita di materiale dalla superficie

Per alcune delle colonne dei prospetti est⁴⁰ (*Sala de los Reyes*), sud⁴¹ (*Sala de Abencerrajes*) e Ovest⁴² (*ala de los Mocarabes*) non è stata riscontrata la presenza di degradi che comportano perdita di materiale dalla superficie. Per

queste colonne, il processo prevede direttamente l'inserimento dei dati disponibili all'interno del modello HBIM. I dati in questo caso sono per di più relativi alla proprietà della colonna (ID, tipologia congiunzione tronco-capitello e basamento) e ai risultati ottenuti in fase di analisi (livello di alterazione attuale e storico). A titolo dimostrativo, di seguito si mostra una scheda tecnica del modello HBIM, relativa alla colonna n. 43 (Fig.10) e la scheda allegata con il repertorio fotografico.

Figura 10 - Scheda tecnica colonna n. 43.

⁴⁰ Colonne n. 31-30-28-43-44-45-46-47.

⁴¹ Colonne n. 50-51-52-53-54-55-71-72-73-74.

⁴² Colonne n. 111-113-114-117.

4.2 Valutazione e gestione colonne con tipologia di degrado che comporta perdita di materiale dalla superficie

Per le colonne caratterizzate da degradi che comportano perdita di materiale dalla superficie, è prevista una procedura più complessa che inizia con la valutazione della variazione del livello di alterazione nel corso del tempo. I dati riguardanti il livello di alterazione sono disponibili a partire dal 1989 e in seguito aggiornati nel 2004, nel 2012 e infine nel 2020. Come si può osservare dal processo metodologico illustrato in figura 3, sono previste in particolare cinque condizioni che possono verificarsi.

Per le colonne che hanno mantenuto un livello di altera-

zione invariato basso⁴³ o medio⁴⁴ ovvero che hanno subito un'evoluzione da basso e medio⁴⁵, è previsto un monitoraggio annuale dello stato di alterazione.

Per quanto riguarda invece le colonne che nel tempo hanno subito un'evoluzione del loro livello di alterazione da medio ad alto (T3-T4 a T5-T6), da alto a estremo (T5-T6 a T7-T8) o nel caso in cui sia rimasto invariato a livelli alti o estremi, la procedura di salvaguardia, prevede il calcolo degli indici di vulnerabilità delle colonne rispetto ad ogni fattore esogeno individuato⁴⁶.

Come si può notare dalla figura 11, la maggior parte delle colonne per cui si è reso necessario il calcolo dell'indice di vulnerabilità, sono collocate nel prospetto Nord del Patio (Sala de dos Hermanas).

Figura 11 - Individuazione colonne soggette al calcolo dell'indice di vulnerabilità.

⁴³ Rientrano in questa categoria la maggior parte delle colonne che caratterizzano il Patio ed in particolare le n. 12-13-110 del prospetto Nord (Sala de dos Hermanas); le colonne n. 14-15-16-17-18-19-20-21-22-23-25-26-29-34-35-37-38-39-40-42-48-49 del prospetto Est (Sala de los Reyes); le colonne n. 56-57-58-59-60-61-62-63-66-67-68-69-70-75-76 del prospetto Sud (Sala de Abencerrajes); le colonne n. 77-78-79-86-87-88-90-91-92-93-95-100-103-104-105-107-108-109 del prospetto Ovest (Sala de los Mocarabes).

⁴⁴ le n. 41-32-24 del prospetto est, le n. 96-97-98 del prospetto ovest e solo la n. 110 del prospetto nord

⁴⁵ le n. 41-32-24 del prospetto Ovest e solo la n. 115 del prospetto Nord.

⁴⁶ Le colonne rientranti nelle condizioni sopracitate e per le quali si procederà con il calcolo dell'indice di vulnerabilità sono così suddivise:

Colonne che hanno subito una variazione del livello di alterazione da medio ad alto: n. 2 - 6 - 9 - 122 del prospetto Nord; n. 99 - 101 del prospetto Ovest;

Colonne che hanno subito una variazione del livello di alterazione da alto a estremo: n. 7 - 8 - 118 - 119 - 120 - 121 - 123 - 124 del prospetto Nord;

Colonne con livello di alterazione invariato estremo: n. 5 prospetto Nord;

Colonne con livello di alterazione invariato alto: n. 1 - 3 - 116 del prospetto Nord.

Figura 12 - Modello HBIM del Patio de los Leones con indicazione priorità di intervento colonne.

Le colonne n. 1 - 5 - 7 - 8 - 120 - 123 - 124, il cui Iv_x è risultato maggiore di 2, sono state sottoposte a gerarchizzazione in funzione dell'urgenza di restauro.

I calcoli derivanti dall'applicazione dell'AHP hanno prodotto come risultato la seguente gerarchia d'intervento:

colonna n. 123 (22% di preferenza);

colonna n. 120 (18% di preferenza);

colonna n. 7 (15% di preferenza);

colonna n. 1 (14% di preferenza);

colonna n. 124 (13% di preferenza);

colonna n. 8 (12 % di preferenza);

colonna n. 5 (5% di preferenza).

Queste, sono facilmente identificabili all'interno del modello HBIM in quanto caratterizzate da una diversa gradazione di colore⁴⁷ come mostrato in figura 12.

5. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

La metodologia descritta nel presente articolo permette la gerarchizzazione di elementi tecnici con un livello di degrado avanzato e simile tra loro, al fine di garantirne la

salvaguardia e di agevolare l'ente gestore nelle procedure di scelta riguardanti gli interventi di restauro.

Pur essendo applicata al caso del *Patio de los Leones*, è generalizzabile ed applicabile a contesti in cui il patrimonio storico è caratterizzato da un elevato numero di elementi ricorrenti (chiostri, colonnati ecc).

Nello specifico, si intende evidenziare gli aspetti della metodologia (Fig. 3) che la rendono replicabile e innovativa. Attraverso l'individuazione del livello di alterazione (LA) dell'elemento tecnico è possibile valutare e quantificare l'evoluzione del degrado, tenendo conto della variazione nel corso del tempo.

Questo passaggio permette di selezionare gli elementi più vulnerabili, ovvero quelli che nell'arco temporale definito hanno mostrato una tendenza evolutiva in peggioramento (es. LA variato da livello medio ad alto, o da alto ad estremo).

Gli elementi appartenenti a questa categoria sono soggetti alla valutazione dell'indice di vulnerabilità.

L'innovazione data da tale indice deriva dalla definizione del danno potenziato Dp_i che, attraverso i termini che lo compongono ovvero d_i (indice di potenziamento del danno) e CC_j (coefficienti correttivi), permette di tenere in conto congiuntamente fattori esogeni, caratteristiche endogene e morfologiche che fanno cioè riferimento alla conformazione della colonna.

⁴⁷ In particolare, la gradazione di rosso più scuro indicherà la prima colonna in ordine gerarchico.

Gli elementi che a seguito di tale valutazione sono risultati più vulnerabili sono stati sottoposti in gerarchia in funzione dell'urgenza di restauro, attraverso l'applicazione dell'*Analytic Hierarchy Process*.

Ulteriore vantaggio che fornisce l'applicazione della metodologia riguarda la gestione dei dati provenienti dalle fasi di analisi, attraverso la definizione di un modello HBIM ed in particolare all'interno delle schede tecniche associate ad ogni elemento. Nello specifico queste schede sono state personalizzate attraverso la creazione di nuovi parametri condivisi che permettono di inserire dati relativi alle caratteristiche strutturali, allo stato di conservazione, al valore degli indici di vulnerabilità per ogni fattore esogeno ed infine alla posizione dell'elemento in gerarchia d'intervento.

In questo modo i dati sono facilmente aggiornabili e consultabili anche da tecnici ed enti gestori.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, si intende proseguire la ricerca con approfondimento relativo all'indice di vulnerabilità e al suo possibile sviluppo, considerando complessivamente la dipendenza fra fattori esogeni e degrado. Inoltre, si auspica di implementare i coefficienti correttivi in modo tale che possano tener conto anche degli aspetti relativi al monitoraggio continuo dell'elemento.

L'obiettivo futuro riguarda quindi la definizione di uno strumento operativo, volto all'ente gestore o all'amministrazione, *user friendly* ma allo stesso tempo capace di valutare i possibili equilibri tra i necessari livelli di conservazione, di manutenzione e le utilizzazioni possibili.

*Giovanna Acampa, Professore Associato – Università di Firenze, Dipartimento di Architettura (DIDA) – Università Kore di Enna, Facoltà di Ingegneria e Architettura
e-mail: giovanna.acampa@unikore.it

**M. Grasso, PhD – Università Kore di Enna, Facoltà di Ingegneria e Architettura
e-mail: mariolina.grasso@unikore.it

Contributo degli autori

Questo articolo è il risultato del lavoro congiunto degli autori. "Abstract", "Introduzione" e "Conclusioni e sviluppi futuri" sono stati scritti da Giovanna Acampa e Mariolina Grasso.

"Materiali e Metodi" e "Risultati" sono stati scritti da Mariolina Grasso.

Giovanna Acampa ha supervisionato l'intero manoscritto.

Bibliografia

- [1] WARMEST EU PROJECT – IoW Altitude Remote sensing for the Monitoring of the state of cultural hEritage Sites: building an inTegrated model for maintenance. <http://warmestproject.eu/> (consultato nov. 22, 2019).
- [2] Girard L.F., *La valutazione delle risorse architettonico-culturali*, p. 12.
- [3] Ivanitskaya L., Clark D., Montgomery G e Primeau R., «[No title found]», *Innov. High. Educ.*, 2002, vol. 27, n. 2, pp. 95–111, doi: 10.1023/A:1021105309984.
- [4] Mondini G., *An Integrated Approach for Assessing Environmental Damage and (Inter)Generational Debt in the Definition of Territorial Transformation Policies*, in *Integrated Evaluation for the Management of Contemporary Cities*, Cham, 2018, pp. 1–15.
- [5] Copiello S. e Bonifaci P., *Internazionalizzazione della disciplina estimativa italiana: evidenze dalla didattica e dalla ricerca di dottorato in un campione di Università*, n. 18, 2017, p. 11.
- [6] Buonincontri P., Caneva G., Maurano C. e Simeon M.I., *Il patrimonio culturale materiale e immateriale*, p. 6.
- [7] GAZZETTA UFFICIALE, <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1964/05/26/064U0310/sg> (consultato feb. 24, 2021).
- [8] GAZZETTA UFFICIALE, <https://www.gazzettaufficiale.it/dettaglio/codici/beniCulturali> (consultato feb. 23, 2021).
- [9] Barbati C., Sciuolo G. e G. Cammelli G., A c. di, *Il diritto del patrimonio culturale*, Bologna: Il mulino, 2017.
- [10] L. 44/08.03.2017: *Tutela e valorizzazione patrimonio culturale immateriale*, Regioni.it, apr. 07, 2017. <http://www.regioni.it/news/2017/04/07/l-4408-03-2017-tutela-e-valorizzazione-patrimonio-culturale-immateriale-508516/> (consultato feb. 24, 2021).
- [11] Manzetti V., *Il patrimonio culturale immateriale tra ordinamento internazionale, europeo e nazionale. Spunti dall'esperienza spagnola*, vol. Nomos, n. 3, 2018.
- [12] FANTINI S., *Beni culturali e valorizzazione della componente immateriale*, Aedon, 2014, n. 1, pp. 0–0, doi: 10.7390/76266.
- [13] FISHBURN P.C., *Letter to the Editor-Additive Utilities with Incomplete Product Sets: Application to Priorities and Assignments*, *Oper. Res.*, giu. 1967, vol. 15, n. 3, pp. 537–542, doi: 10.1287/opre.15.3.537.

- [14] MILLER D.W., *Executive decisions and operations research*, 1963.
- [15] ZAVADSKAS E.K., TURSKIS Z. e ANTUCHEVICIENE J., *Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment*, *Electron. Electr. Eng.*, vol. 122, n. 6, pp. 3–6, giu. 2012, doi: 10.5755/j01.eee.122.6.1810.
- [16] SAATY T.L., *How to make a decision: the analytic hierarchy process*, vol. *European journal of operational research*, 1990, n. 48.1, pp. 9–26.
- [17] ROY B., *Classement et choix en présence de points de vue multiples*, *Rev. Fr. Inform. Rech. Opérationnelle*, 1968, vol. 2, n. 8, pp. 57–75, doi: 10.1051/ro/196802V100571.
- [18] HWANG C.L. e MASUD A.S.M., *Multiple objective decision making-methods and applications: a state-of-the-art survey*, Springer Science & Business Media, 2012, vol. 164.
- [19] BRANS J.P. e VINCKE PH., *Note-A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making)*, *Manag. Sci.*, giu. 1985, vol. 31, n. 6, pp. 647–656, doi: 10.1287/mnsc.31.6.647.
- [20] OPRICOVIC S., *Multicriteria optimization of civil engineering systems*, *Fac. Civ. Eng. Belgrade*, 1998, vol. 2, n. 1, pp. 5–21.
- [21] BRAUERS W.K.M. e ZAVADSKAS E.K., *Project management by multimooora as an instrument for transition economies / projekt vadyba su multimooora kaip priemon perinamojo laikotarpio kiams*, *Technol. Econ. Dev. Econ.*, mar. 2010, vol. 16, n. 1, pp. 5–24, doi: 10.3846/tede.2010.01.
- [22] RIBERA F., NESTICÒ A., CUCCO P. e MASELLI G., *A multicriteria approach to identify the Highest and Best Use for historical buildings*, *J. Cult. Herit.*, gen. 2020, vol. 41, pp. 166–177, doi: 10.1016/j.culher.2019.06.004.
- [23] HAROUN H.-A.A.F., BAKR A.F. e HASAN A.E.-S., *Multi-criteria decision making for adaptive reuse of heritage buildings: Aziza Fahmy Palace, Alexandria, Egypt*, *Alex. Eng. J.*, giu. 2019, vol. 58, n. 2, pp. 467–478, doi: 10.1016/j.aej.2019.04.003.
- [24] FORTE F., DEL GIUDICE V., DE PAOLA P. e TROISI F., *Erratum: Forte F. et al. Valuation of the Vocationality of Cultural Heritage: The Vesuvian Villas. Sustainability 2020, 12, 943*, *Sustainability*, mar. 2020, vol. 12, n. 5, p. 2069, doi: 10.3390/su12052069.
- [25] WANG Q., YANG C., LU J., WU F. e XU R., *Analysis of preservation priority of historic buildings along the subway based on matter-element model*, *J. Cult. Herit.*, set. 2020, vol. 45, pp. 291–302, doi: 10.1016/j.culher.2020.03.003.
- [26] DELLA SPINA L., *Adaptive Sustainable Reuse for Cultural Heritage: A Multiple Criteria Decision Aiding Approach Supporting Urban Development Processes*, *Sustainability*, feb. 2020, vol. 12, n. 4, p. 1363, doi: 10.3390/su12041363.
- [27] APPIOTTI F. et al., *Definition of a Risk Assessment Model within a European Interoperable Database Platform (EID) for Cultural Heritage*, *J. Cult. Herit.*, nov. 2020, vol. 46, pp. 268–27, doi: 10.1016/j.culher.2020.08.001.
- [28] OPPIO A. e DELL’OVO M., *Cultural Heritage Preservation and Territorial Attractiveness: A Spatial Multidimensional Evaluation Approach*, in *Cycling & Walking for Regional Development*, Pileri P. e Moscarelli R., A c. di Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 105–125. doi: 10.1007/978-3-030-44003-9_9.
- [29] BOTTERO M., D’ALPAOS C. e OPPIO A., *Ranking of Adaptive Reuse Strategies for Abandoned Industrial Heritage in Vulnerable Contexts: A Multiple Criteria Decision Aiding Approach*, *Sustainability*, vol. 11, n. 3, p. 785, feb. 2019, doi: 10.3390/su11030785.
- [30] FERRETTI V., BOTTERO M. e MONDINI G., *Decision making and cultural heritage: An application of the Multi-Attribute Value Theory for the reuse of historical buildings*, *J. Cult. Herit.*, nov. 2014, vol. 15, n. 6, pp. 644–655, doi: 10.1016/j.culher.2013.12.007.
- [31] TORRIERI F., OPPIO A. e ROSSITTI M., *Cultural Heritage Social Value and Community Mapping*, in *New Metropolitan Perspectives*, vol. 178, Bevilacqua C., Calabrò F. e Della Spina L., A c. di Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1786–1795. doi: 10.1007/978-3-030-48279-4_169.
- [32] CAMPO O., BATTIST, F. e ACAMPA G., *Integrated Multi-criteria Assessments in Support of the Verifying the Feasibility of Recovering Archaeological Sites: The Case of Portus-Ostia Antica*, in *New Metropolitan Perspectives*, vol. 178, Bevilacqua C., Calabrò F. e Della Spina L., A c. di Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1952–1961. doi: 10.1007/978-3-030-48279-4_184.
- [33] SALVO F., DELL’OVO M., TAVANO D. e SDINO L., *Valuation Approaches to Assess the Cultural Heritage*, in *New Metropolitan Perspectives*, vol. 178, Bevilacqua C., Calabrò F. e Della Spina L., A c. di Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1746–1754. doi: 10.1007/978-3-030-48279-4_165.
- [34] FORTE F., DEL GIUDICE V., DE PAOLA P. e DEL GIUDICE F.P., *Cultural Heritage and Seismic Disasters: Assessment Methods and Damage Types*, in *Appraisal and Valuation*, Morano P., Oppio A., Rosato P., Sdino L. e Tajani F., A c. di Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 163–175. doi: 10.1007/978-3-030-49579-4_12.
- [35] CELADYN M., *Interior Architectural Design for Adaptive Reuse in Application of Environmental Sustainability Principles*, *Sustainability*, lug. 2019, vol. 11, n. 14, p. 3820, doi: 10.3390/su11143820.
- [36] ACAMPA G. e GRASSO M., *Heritage Evaluation: restoration plan through HBIM and MCDA*, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, nov. 2020, vol. 949, p. 012061, doi: 10.1088/1757-899X/949/1/012061.
- [37] CNR, *Normal 20/85: Interventi conservativi: progettazione esecuzione e valutazione preventiva*, Roma, 1985.

- [38] ACAMPA G., GRASSO M., MARINO G. e PARISI C.M., *Tourist Flow Management: Social Impact Evaluation through Social Network Analysis*, Sustainability, gen. 2020, vol. 12, n. 2, p. 731, doi: 10.3390/su12020731.
- [39] LIVRAGHI C., PIANEZZE F. e SCALTRITTI M., *Attività ispettiva sulle aree archeologiche milanesi. Analisi documentale, valutazione del degrado e delle condizioni di rischio*, LANX Riv. Della Scuola Spec. Archeol. - Univ. Degli Studi Milano, 2014, n. 19, Art. n. 19, doi: 10.13130/2035-4797/4887.
- [40] Italia, Ministero per i beni e le attività culturali, Moro L. e Neri A., *Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale: allineamento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni: circolare n. 26, 2 dicembre 2010*. Roma: Gangemi, 2010.
- [41] FRANCINI C., CHIESI D., MONTACCHINI A. e PORCILE M., *Appunti per un modello di Valutazione di Impatto sul Patrimonio (HIA)*, p. 51.
- [42] LAZZERI E., *Un modello multi-hazard per la valutazione del rischio dei beni archeologici: il caso sperimentale della Villa Adriana di Tivoli*, Archeologia e Calcolatori n. XXII - 2011, gen. 01, 2011. http://www.archcalc.cnr.it/journal/id.php?id=oai:www.archcalc.cnr.it/journal/A_C_oai_Archive.xml:683 (consultato gen. 20, 2021).
- [43] GRECO S., EHRGOTT M. e FIGUEIRA J.R., A c. di, *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, Second edition. New York Heidelberg Dordrecht : London: Springer, 2016.
- [44] MOYANO J., ODRIÓZOLA C.P., NIETO-JULIÁN J.E., VARGAS J.M., BARRERA J.A. e LEÓN J., *Bringing BIM to archaeological heritage: Interdisciplinary method/strategy and accuracy applied to a megalithic monument of the Copper Age*, J. Cult. Herit., vol. 45, pp. 303–314, set. 2020, doi: 10.1016/j.culher.2020.03.010.