



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA

Facultad
de Ingeniería
& Ciencias







La articulación de redes, tanto a nivel nacional como internacional, es hoy un imperativo en las instituciones de educación superior complejas. Especialmente en el ámbito de la investigación y del desarrollo científico-tecnológico, donde el intercambio de conocimiento y la colaboración es fundamental para fortalecer líneas de interés común.

En este sentido, es importante destacar la contribución del Departamento de Ingeniería de Obras Civiles de la Universidad de La Frontera, al liderar una revista que promueve la divulgación en investigación básica y aplicada asociada al área de la construcción, uno de los campos de estudio más emblemáticos de esta institución.

Es así, como en esta nueva edición, RIOC reúne un grupo de artículos que permiten visibilizar el trabajo científico que se canaliza a través de nuestra Universidad, orientados a enfrentar diferentes desafíos asociados a temas como la optimización de recursos, calidad en infraestructura, riesgo sísmico, entre otros.

En su conjunto, estos trabajos nos brindan una mirada actualizada del quehacer en el área de la construcción, insumo valioso para profesionales, académicos y estudiantes que comparten el compromiso de ser un aporte al desarrollo de la sociedad, ya sea en un escenario local como global.

Ese es el espíritu que ha permitido consolidar a RIOC, en su novena edición, como una publicación rigurosa y seria de divulgación científica-tecnológica, promoviendo el intercambio y actualización de conocimientos en ingeniería y gestión en la construcción.

Dr. Renato Hunter Alarcón
Vicerrector de Investigación y Postgrado
Universidad de La Frontera



RIOC es una revista de carácter científico - tecnológico que proporciona un foro nacional e internacional para la difusión de la investigación y desarrollo en todos los ámbitos relacionados con la construcción, entendiéndose áreas como materiales de construcción, ciencias de la ingeniería aplicada, arquitectura, edificación, obras civiles, gestión de proyectos, entre otras.

En un momento en que existe una gran necesidad en todos los profesionales del área de la construcción por estar continuamente actualizados, para optimizar el uso de recursos, utilizar nuevas tecnologías que sean sustentables y eficientes, y a su vez, emplear nuevos métodos de construcción y materiales, RIOC proporciona un espacio para compartir y divulgar conocimientos, de manera tal, de abrir la discusión en estas temáticas planteadas, entregando información esencial que ayudará a mejorar la eficiencia, la productividad y la competitividad en los profesionales del área de la construcción. Por lo tanto, es una lectura esencial para proporcionar a los profesionales del área, académicos y alumnos que trabajan e investigan en este campo, un material de discusión que renueve y actualice sus conocimientos.

En este contexto, RIOC hace extensiva la invitación a todos los interesados a publicar sus artículos con la finalidad de divulgar la producción científica - tecnológica de académicos, investigadores, profesionales y estudiantes en temas relacionados con el desarrollo del área de la construcción.

Comité Editorial Asociado
Revista Ingeniería de Obras Civiles
Universidad de La Frontera



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA
Departamento de
Ingeniería de Obras Civiles
Facultad de Ingeniería
& Ciencias



Directora
Viviana Letelier

Editor Responsable
Leonardo Sierra

Editores de Producción
Camila Parodi
Daphne Bormann
Javier Vidal
Gonzalo Valdés

Revista Ingeniería de Obras Civiles

Avda. Francisco Salazar 01145,
Temuco,
Región de La Araucanía,
Chile.

Departamento de
Ingeniería de Obras Civiles,
Universidad de La Frontera.

Fono:
+ 56 (45) 2325680

Fax:
+56 (45) 2325688

Correo Electrónico:
rioc@ufrontera.cl

Comité Editorial

Ph.D Pedro Muñoz
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chile, Talca, Chile.

Ph.D. Alejandra Calabi
Departamento Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La
Frontera, Temuco, Chile.

Ph.D. Amilkar Ilaya Ayza
Universidad Técnica de Oruro. Oruro. Bolivia.

Ph.D. Adriana Martínez
Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio,
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

MSc. Carlos Andrés Aguirre
Escuela de Construcción Civil, Universidad de Las Américas, Santiago,
Chile.

Ph.D. Oscar Link
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción,
Concepción, Chile.

Ph.D. Galo Valdebenito
Instituto de Obras Civiles, Universidad Austral, Valdivia, Chile.

PhD. Kevin Luna Villarreal.
Departamento de Ingeniería Civil, Instituto Tecnológico y de Estudio
Superiores de Monterrey, Monterrey, Mexico.

Ph.D. Mario Salazar
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana, Morelia,
México.

Ph.D. Oscar Reyes
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada,
Bogotá, Colombia.

PhD. Ramón Botella
Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio,
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Ph.D. Virginia Vásquez
Departamento de Arquitectura, Universidad Austral, Valdivia, Chile.



Sumario

- 07.** Optimal Location of Crashing Plants for Transportation of Base Course Material during the Construction Phase: A Case Study from a South American Project.
Ubicación Óptima de Plantas de Chancado para el Transporte de Material de Base Granular durante la etapa de Construcción: Un caso de Estudio de un Proyecto en Sudamérica
F. Araya, A. Vila.
- 18.** Análisis del flujo transitorio usando esquemas numéricos explícitos e implícitos en una malla espacio-tiempo no uniforme.
Transient flow analysis using explicit and implicit numerical schemes in a non-uniform time-space mesh.
J. Twyman.
- 30.** Modelo de Calidad Para la Infraestructura Urbana de un Proyecto Inmobiliario Basado en el modelo 3CV+2.
Quality model for urban infrastructure in a real estate project based on the 3CV + 2 model.
M. Davis, S. García
- 41.** Ecuaciones de Predicción del Movimiento Fuerte para un Sistema de Alerta Temprana de Terremotos.
Ground Motion Prediction Equations for a Early Warning System Earthquake.
G. Sancy.
- 53.** Análisis de redes sociales aplicado a los procesos de gestión de proyectos según Project Management Body of Knowledge en la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción.
Social network analysis, applied to project management processes by Project Management Body of Knowledge in architecture, engineering and construction industry.
C. Lobos J. Matus, C. Santelicies.

Optimal Location of Crashing Plants for Transportation of Base Course Material during the Construction Phase: A Case Study from a South American Project.

Ubicación Óptima de Plantas de Chancado para el Transporte de Material de Base Granular durante la etapa de Construcción: Un caso de Estudio de un Proyecto en Sudamérica.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Article history:

Received
02-12-2018
Accepted
25-02-2019
Available
29-04-2019

Keywords:
Cost optimization model
Base course construction
Transportation cost
Infrastructure projects.

Historial del artículo:

Recibido
02-12-2018
Accepted
25-02-2019
Available
29-04-2019

Palabras Clave:
Modelo de optimización de costos
Construcción de capa base
Costo de transporte
Proyectos de infraestructura.

F. Araya^{1,2}, A. Vila²

¹Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

²Construction Engineering and Project Management program, The University of Texas at Austin, USA.
felipe.araya@usm.cl. teléfono: +56 32 265 4185.

Abstract

The transportation of base-course materials during construction is a challenging process of infrastructure projects, involving sub-processes such as quarrying, crushing, hauling, placement and compaction. The high cost of transporting base-course materials increases the total cost of the construction project. Thus, minimizing the cost of the transportation of base-course material during the construction may improve the performance in terms of highway infrastructure projects cost. This research presents an optimization model based on linear programming of the cost of transportation for base-course material that accounts for costs of extracting material, transportation from the quarry to the crushing plant, the cost of crushing material, transportation from the plant to the field, and the installation in the field. The proposed model is then implemented on a highway project constructed in Peru. The results emphasize the relevance of the location of the crushing plants within the project area and its impact on transportation costs. For instance, in the case study presented, the lowest cost was obtained when installing two crushing plants instead of one. The principal contribution of this study is providing an approach for construction managers and engineers providing better information to make decisions during the planning of base-course construction processes for highway infrastructure projects.

Resumen

El transporte de materiales base durante la etapa de construcción es un proceso con desafíos para los proyectos de infraestructura que involucra procesos como la extracción, chancado, transporte, colocación y compactación. El alto costo del transporte de materiales base aumenta el costo total de construir un proyecto. Por lo tanto, minimizando el costo de transporte de material base durante la construcción puede mejorar el desempeño en términos de costo en proyectos de infraestructura. Por lo tanto, esta investigación presenta un modelo de optimización basado en programación lineal del costo de transportar material base que considera los costos de: extracción del material, transporte desde la cantera de extracción hasta la planta de chancado, el costo de chancado del material, transporte desde la planta hasta el terreno, y la instalación en el terreno del Proyecto. El modelo propuesto es implementado en un Proyecto de carretera construido en Perú. Los resultados enfatizan la importancia de la ubicación de la planta de chancado dentro del proyecto y los impactos en los costos de transportar el material. Por ejemplo, en el caso estudio presentado el costo más bajo fue obtenido cuando se consideraron dos plantas de chancado en lugar de solo una. La contribución principal del presente estudio es entregar un método para los administradores de proyectos de construcción

e ingenieros que provee mayor información para la toma de decisiones durante la planificación de los procesos constructivos de capas base en proyectos de infraestructura de carreteras.

1. Introduction

Highways projects are of high relevance for the development of countries. These projects improve the quality of life of citizens (e.g., providing connectivity and facilitating transportation among different regions within the country), and incentivize the economic growth of nations. Additionally, due to the urbanization trends from last decades—e.g., for first time in human history more population are residing in urban than in rural areas (Habitat U.N., 2016), so the demand for additional highway infrastructure is likely to increase in the upcoming years. However, one of the barriers that countries around the globe will face (more likely developing countries), are the financial limitations faced while responding these increased demands for infrastructure. Alternatives to reduce the costs of transportation infrastructure, namely highway projects, are required, thus reducing the cost associated to development of transportation infrastructure may facilitate the construction of this type of projects, which is fundamental from a developing nations standpoint.

One of the most expensive activities of highway construction projects is the allocation of earthwork (Bogenberg et al., 2015; de Lima et al., 2012; Dell'Amico et al., 2016; Karimi et al., 2007; Stark and Mayers, 1983), which involves finding the most economically convenient way to cut and fill sections of the project, and to estimate the volumes to be moved. Although the process of estimating the volume to be excavated is relatively simple, the execution of the excavation process is not (Peurifoy and Oberlender, 1991); an improper execution may lead to adverse effects such as delays or additional costs during the earthwork process. Thus, improving the understanding of earthwork activities becomes relevant for construction companies and engineers to minimize such potential negative impacts, specifically, regarding the financial performance of highway projects. The performance of the earthwork process is influenced mainly by two type of factors, the existing conditions of the project such as length of the project, soil conditions, and weather conditions in the project location; and management factors, for instance the equipment and methods used to perform the earthwork, which determine the cost of the earthwork process. Although it is essential to have a better understanding of all the variables that influence the earthwork process, this study is focused on the management of the transportation costs related to the project, namely modeling the cost of the transportation of base-course material during the construction of highway projects and the optimization of such cost.

In the existing literature, the first approach included the method of mass diagram Mayer and Stark (1981), which is a graphical representation of earth volumes to determine the sections to be cut and filled, and the quantities of material to be transported. However, this method suffered from multiple limitations, for instance, it was only applicable to linear roads, was not able to include mixed soils in the model, and was time-consuming and prone to error (Henderson et al., 2003). Consequently, multiple studies have been developed to overcome these limitations of the mass diagram, mainly implementing optimization techniques such as linear programming (Bogenber et al., 2015; de Lima et al., 2012; Liu and Lu, 2015; Yi and Lu, 2016), fuzzy linear programming (Karimy et al., 2007), or heuristic algorithms (Marzouk and Moselhi 2004; Nassar et al. 2011). Additionally, in recent years, the implementation of new technologies such as GIS and BIM have been explored to enhance different modeling aspects from the earthwork process in construction projects (Kim et al., 2015; Moselhi and Alshibani 2009; Tanoli et al., 2018).

Linear programming models have been extensively used to model earthworks during highway projects due to its effectiveness and simplicity. For example, de Lima and colleagues (2012) developed a model to optimize the excavation and paving processes, focused on the geometry and geotechnical characteristics of the project, and the allocation of materials to minimize the construction cost. Their results showed that the implemented model might provide valuable information for engineers and managers during the planning phase of the project regarding the optimal cost of construction. Similarly, Bogenberg et al. (2015) proposed a two-step optimization model for earthwork in highway construction. The first step involved minimizing the flow of construction materials during the entire duration of the project, according to the corresponding schedule. Then, the second step involved optimizing the distribution for each material involved in the construction process, notably not only excavation materials were taken into account, but also materials for recycling and filling were included. The model was implemented during the construction of a highway project in Europe, and the results showed a successful implementation of the model. Based on the claim that real-world projects present inherent uncertainty related to their execution, Karimy et al. (2007) suggested the inclusion of uncertainty to the existing model by modeling unit costs and borrow pits/disposal capacities as non-deterministic values, while minimizing the cost of the earth moving process. The results suggested that by including fuzzy variables to the model, engineers and managers might generate different models more representative of the real conditions. However, such additional

information increase the computational cost of models (Karimy et al. 2007).

Regarding the implementation of heuristic algorithms to optimize earthwork in highway construction projects, techniques such as genetic algorithms are newer than linear programming. The main difference between these two techniques, linear programming finds the optimal solution according to the defined objective function and constraints, while in the case of genetic algorithms the solution found may not necessarily be optimal. Marzouk and Moselhi (2004) implemented a genetic algorithm to assess the trade-offs between time and costs of earthmoving operations. The results showed that this type of technique is well suited for what-if analysis for decision-makers, which can be useful when comparing multiple alternatives during the planning phase. Furthermore, there are studies in which the methodologies previously discussed have been combined (Lin et al., 2011; Moselhi and Alshibani, 2009). For example, Moselhi and Alshibani (2009) combined genetic algorithms, linear programming, and GIS, while implementing a model to optimize the planning of earthmoving operations, as well as quantities of earth to be cut and filled and placed at different landfill sites according to project constraints. Finally, in recent years, the implementation of new technologies, such as GIS and BIM has also been transferred to the development of earthwork optimization models (Kim et al., 2015; Tanoli et al., 2018). For instance, Kim et al. (2015) developed a framework to integrate data from BIM with GIS platform for infrastructure projects. Then, that information was used to feed a genetic algorithm to optimize cut and fill operations. Consequently, generating an optimal construction plan (Kim et al., 2015).

As previously discussed, multiple studies in the literature have focused mostly on the optimization side of the problem; however, a significant limitation in the literature is the application of such approaches to real construction projects; specifically in regions other than North America and Europe. Considerable differences among these geographic regions such as skilled labor availability, contracting law, the technology available, and different culture and costs from the construction workers may have a considerable impact on earthwork operations. As such, this study contributes to the body of knowledge by implementing a linear programming based optimization model in the context of a real project developed in South America, which provides a practical framework to obtain information for the decision-making process of engineers and managers during the planning phase of highway construction projects. Furthermore, for the solution of the model, it was used Microsoft Excel, which is a familiar interface for engineers and construction managers. This interface facilitates the use of this optimization approach for professional that do not master programming skills. Another potential contribution of this study is for construction engineering teaching purposes. The

study of a specific methodology in the context of a real construction project may provide a more intuitive approach for students learning about optimization techniques in construction engineering and management schools. Araujo L.S., Ramos H., Coelho S.T. (2006). Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, 20: 133-149.

2. Methodology

In this section, the optimization model is described and explained, as well as the variables used to develop the model.

2.1 Construction Process components

The transportation of the construction materials to build the base course in highway projects may be conceptualized in different ways; nonetheless, in this study, we understand this process as represented in **Figure 1**. As such, the entire process encompasses the quarrying process (hauling raw material from quarries to crushing plant), the crushing process (hauling granular material from crushing plant to highway stages), and the installation of the granular material in the field.

This model represents the construction processes involved during a highway project and allows analyzing different conditions to calculate the costs involved transporting base course materials. For example, the model considers the travels that trucks must do in order to deliver aggregates from the quarrying site/plant to the construction site. The model optimizes the cost of the entire process subjected to different types of restrictions such as resources constraints, physical constraints, and geometric constraints that are explained below.

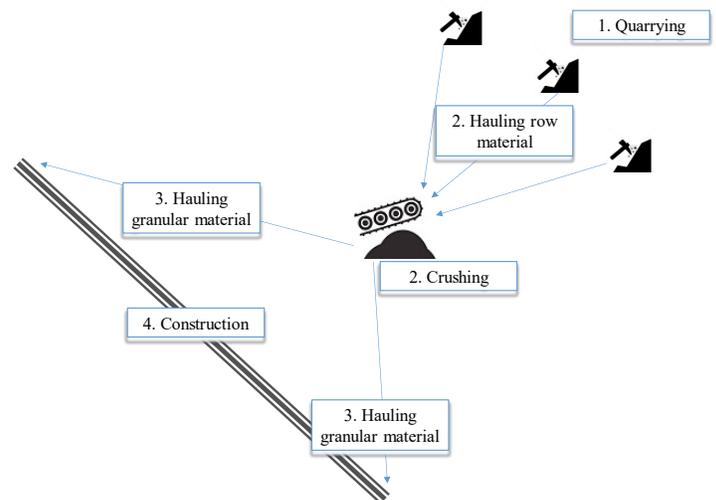


Figure 1 Base course construction phases (own elaboration).

2.2 Proposed Model

The model uses a function to represent the cost of transporting base course materials during a highway construction project; such cost considers the location of stone quarries, the location of crushing plants, and hauling distance conditions.

The objective function of the model will represent the total cost (sum of the cost of all five stages) of transport earthwork volumes along the base course construction process, from Quarrying location points to the crushing plant and then from the crushing plant to the construction site. The cost to move earth volume during each stage will be calculated such as a unit cost multiplied by the volume of earth that is being moved. The unit costs for each of the five stages are estimated based on the information available from the case study presented in the next sections—i.e., unit costs of their processes and cost of a crushing plant.

The constraints associated to the problem to be modeled have been identified as the following types: (1) physical limitations for the capacity of quarrying location points to provide material to the crushing plant to generate the final material to be moved. (2) The capacity of the crushing plant to process the original material and create the final material to be installed on the construction points. (3) The amount of earth volume demanded by each construction node will be considered constant and will depend on how many nodes are used to divide the problem. (4) The topology of the different paths that earth volume can take because the distance between points is considered as the minimum distance (“as the crow flies”). However, the model considers these limitations including a different unit cost when the earth volume is moved with or without slope, and when trucks that move the material to the construction site are going to leave the material (full condition) or going back to the plant (empty condition). The decision variables are defined as the earth volume to be moved between the quarrying location points and the crushing plant to generate the final material to be installed, and the earth volumes of material from the crushing plant to the construction site. Each type of travel will have different unit costs, depending on how far are they from the plant.

A limitation of this study is that the information to generate the unit costs between the different locations connecting the different paths along the process comes from a real project done in South America, which corresponds to the case study presented in this manuscript. It is important to emphasize this limitation because for infrastructure projects with a similar scope, but located in other countries; these values might differ. For instance, in South America labor costs are lower when compared with North America, limiting the direct transferability of results in different countries. Nonetheless, the methodology implemented

during this study can be transferred to highway construction projects located in other regions.

2.3 Optimization Model

Figure 2 illustrates the abstraction of the problem being analyzed in this study. Furthermore, the formulation of the optimization model explained below is based on the processes shown in **Figure 2**. The model shows the sequence of activities required to build the base course of a highway project. The process starts with the quarrying process, and then the raw material has to be hauled from quarries to a crushing plant—i.e., the P symbol in **Figure 2**. After that, the raw material is crushed and then temporarily stored. Finally, the crushed (granular) material is hauled from the crushing plant to where is planned to be applied in the field, and in each stage, the material is poured and compacted. The variable defined as X_p (**Figure 2**) is used to measure the distance between the crushing plant and the location of the different quarries in the project.

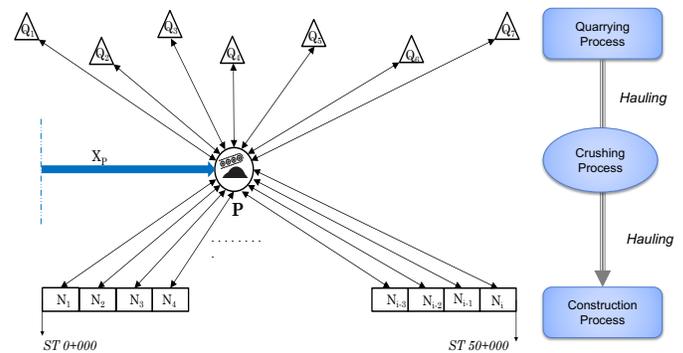


Figure 2 Model of the problem (own elaboration).

In the quarrying process, cost depends on equipment quantity and efficiency, geology, and explosives technology. That is why in the model, it is considered an average unit cost in $\$/m^3$. The hauling activities in real projects is a complex process that depends on truck quantity, time availability, roads topology, equipment efficiency, fuel consumption, and driver’s expertise. In the model, two kinds of hauling are considered. The first one is the raw material hauling from quarries to crushing plant. In this case, the present project assumes that arc capacity is not restricted, so it simplified the hauling process considering one unloaded travel from the crushing plant to a quarry, and a second trip from the quarry to the crushing plant. (**Figure 3**)

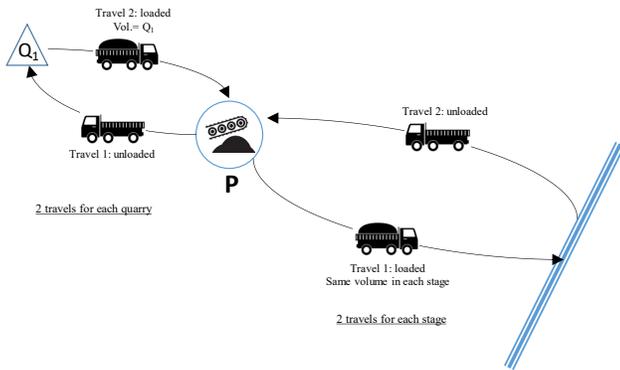


Figure 3 Hauling process detail in the model (Own elaboration).

The second type of hauling is the granular material hauling from the crushing plant to the construction field. As in the previous process, the project considers one travel loaded from crushing to the construction field and a second unloaded travel from the field to the crushing plant. (Figure 3) In this case, it is assumed that the same volume is hauled in all the arcs. The real profile of a highway has a mix of uphill and downhill sections, and consequently, this topology impacts the time and cost of hauling. In the present project, the highway analyzed has a permanent positive gradient of 1%, see as a reference (Figure 4). Finally, the base course studied has been modeled as a rectangular cross-section.

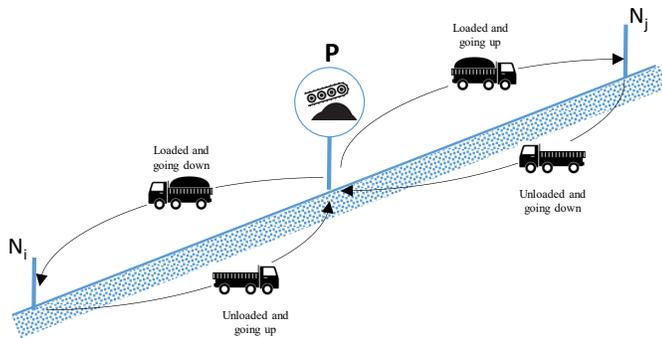


Figure 4 Impact of crushing plant location and hauling process (Own elaboration).

Therefore, the objective function proposed to minimize the base course construction cost is defined in equation 1.

Objective Function

$$\text{Min } \{Z\} = \text{Quarrying Cost} + \text{Hauling raw material cost} + \text{Crushing cost} + \text{Hauling granular material} + \text{Base course collocation cost} \quad (1)$$

The formulation of the costs of the five different sub-processes and the corresponding variables and constraints are defined as follow:

Quarrying Cost

The cost of the quarrying process is obtained by multiplying the total volume of the base course of the highway project by the unit cost of the quarrying process as shown in equation 2. As a special consideration for the calculation of the base course volume, a swell/shrinkage percentage was also included in the calculation of the total base course volume.

$$\text{Quarrying cost} = \frac{\text{Shrink}}{\text{swell}} \text{ factor} \times \text{Base Course Volume } [m^3] \times \text{quarrying unit cost } (\$/m^3) \quad (2)$$

Crushing Cost

For the crushing cost, the structure considers a rental cost and the cost of crushing the available base course material. Similarly to the previous structure, the base course volume is multiplied by a shrink/swell factor (Eq. 3).

$$\text{Crushing cost} = \text{rent cost}(\$) + \frac{\text{Shrink}}{\text{swell}} \text{ factor} \times \text{Base course volume } [m^3] \times \text{crushing unit cost } (\$/m^3) \quad (3)$$

Base course collocation cost

The cost of installing the base course in the highway is expressed as the total base course volume multiplied by the unit cost of such process (Eq. 4).

$$\text{Base course collocation cost} = \text{Base course volume } [m^3] \times \text{collocation unit cost } (\$/m^3) \quad (4)$$

Hauling raw material cost

The cost of hauling raw material from the quarries to the crushing plant considers the cost of the entire transportation cycle. As such, the function includes a cost from the quarries to the crushing plant, but also the cost from the crushing plant to the quarries (Eq. 5). Considerations were made regarding the fact that the cost of returning to the quarries are lower since unloaded trucks are more fuel efficient than loaded trucks.

$$\text{Hauling raw material cost} = \sum_{i=1}^7 X_{Q_i P} \times C_{Q_i P} + \sum_{i=1}^7 X_{P Q_i} \times C_{P Q_i} \quad (5)$$

Where: $X_{Q_i P}$ = distance from quarry Q_i to P (crushing plant), $C_{Q_i P}$ = hauling unit cost from quarry Q_i to P (crushing plant), $X_{P Q_i}$ = distance from P to quarry Q_i and $C_{P Q_i}$ = hauling unit cost from P to quarry Q_i .

Hauling Granular material cost

Similarly to the structure of hauling the raw material. In this case, hauling the granular material cost considers the cost of transporting the base course material from the crushing plant to the construction site (Eq. 6). Specifically, to the highway section that is under construction. To quantify the distance of each section under construction, the model discretizes the length of the highway in multiple nodes. For instance, in the case study described below, the length of the project was 50 kilometers, and the model used 1,000 nodes; therefore nodes were located every 50 meters. The main criteria to define the number of nodes was keeping a balance between practicality and the computational cost or solving the model.

$$C_{PN_i} + \sum_{i=1}^n X_{N_iP} \times C_{N_iP} \times X_{PN_i} \quad (6)$$

Where: X_{PN_i} = distance from crushing plant P to construction(node) N_i , C_{PN_i} = hauling cost from crushing plant P to construction(node) N_i , X_{N_iP} = distance from N_i to P and C_{N_iP} = hauling cost from N_i to P .

Constraints

The constraints of the model, which aim to reflect the practical decision-making context of the problem, are presented. The first constraint is that the crushing plant to be installed in the project must be located within the boundaries of the project (Eq. 7).

$$Crushing\ Plant\ location \leq \text{length of the project} \quad (7)$$

The following constraint relates to the condition that the hauling volumes involved in the project must be lower or equal than the capacities of the quarries from the project. It is impossible to extract more than the capacity of the quarries (Eq. 8)

$$Hauling\ volume \leq Quarry\ Capacity \quad (8)$$

The next constraint related to the fact that the hauling volumes involved in the project must be greater than the volume required to build the project. Such assumption implies that the installation of base course material in the project will be exclusive from the material extracted from the quarries.

$$Hauling\ volume \geq Volume\ demanded\ by\ Project \quad (9)$$

The last constraint is that the variables related to the model cannot be negative (Eq. 10).

$$All\ values\ are\ nonnegative \quad (10)$$

Model Solution

For the solution of the proposed model, the next paragraph has a detailed description of how the authors got the results, specifically the results of the case study presented in the next section.

The first step is to input data into the spreadsheet developed using MS Excel to implement the model (Figure 5). Data from the highway characteristics such as the length of the project, width, thickness of the base course, and swell/shrinkage factor had to be added as general information from the project. Additionally, the unit prices of the quarrying, crushing, hauling, and base course installation costs had also to be added. As showed in Figure 5, the decision variables were the hauling volume from each quarry to supply the required base course material for the project. After the input of the data, the user must choose an initial location for the crushing plant, as well as the initial quantity of nodes to discretize the length of the project.

Regarding solving the optimization problem, the Solver tool from MS Excel was used to obtain the solution. This tool allows solving linear and non-linear programming problems. In this case, since our problem is modeled as Linear Programming, the simplex method was adopted (Figure 6).

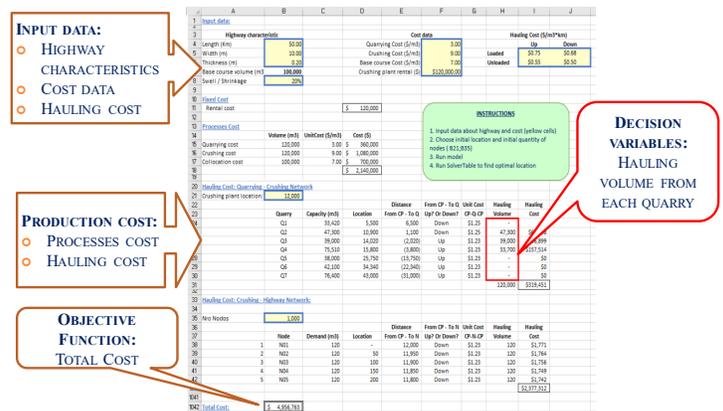


Figure 5 MS Excel interface to input data into the model (Own elaboration)

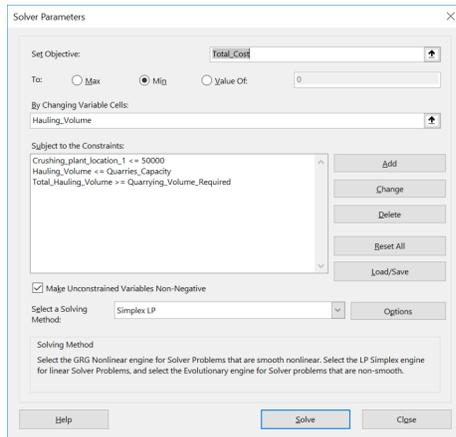


Figure 6 MS Excel interface to solve the optimization problem using the Simplex method (From using MS Excel).

3. Case study

The following case study has the intention to illustrate how the proposed model and methodology work using data from a real construction project. The project used as a case study corresponds to a highway construction project located in Arequipa, a southern city of Peru. General characteristics from the project that are relevant to the formulation of the problem are the following:

- Total length=50km
- Volume required (Base course) =100,000 m³
- Roadway width: 10m
- Base course thickness: 0.20m
- Swell=Shrinkage=20%
- Permanent 1% Gradient from start to end (ST 0+000 to ST 50+000)
- Crushing plant rental cost(\$): 120,000
- Quarries location and capacity (**Table 1**)
- Unit costs of the processes (**Table 2**)

The amount of base course material required for each node of the model was assumed as uniform, and calculated based on the following expression:

$$\text{Volume in each node} = \frac{\text{Total Volume (Base course)}}{\text{Number of nodes}} \quad (8)$$

As part of the modeling process, the numbers of nodes in the highway were gradually increased to assess the sensibility of the model regarding the number of nodes. In regards to the structure of the capacity of the quarries in the project, the unit costs in the case study the values for the different structures of the costs can be seen in **Tables 1-3**.

Table 1 Quarries capacity and location (Own elaboration).

Item	Stage	Capacity (m ³)
1	05+500	33,420
2	10+900	47,300
3	14+020	39,000
4	15+800	75,510
5	25+750	38,000
6	34+340	42,100
7	43+000	76,400

Table 2 Unit costs of processes (Own elaboration).

Process	Unit Cost (\$/m ³)
Quarrying cost	3.00
Crushing cost	9.00
Base course cost	7.00

Table 3 Hauling costs for different conditions (Own elaboration).

	Positive gradient (\$/m ³ *km)	Negative gradient (\$/m ³ *km)
Loaded	\$0.75	\$0.68
Unloaded	\$0.55	\$0.50

Consequently, taken into account all the information presented about the model structure and information from the project used as a case study. The structure of the five different sub-processes that are part of the optimization model are the following:

a) $Quarrying\ cost = 120,000m^3 \times quarrying\ unit\ cost\ (\$/m^3)$

b) $Crushing\ cost = rent\ cost(\$) + 120,000m^3 \times crushing\ unit\ cost\ (\$/m^3)$

c) $Base\ course\ collocation\ cost = 100,000m^3 \times collocation\ unit\ cost\ (\$/m^3)$

d) $Hauling\ raw\ material\ cost = \sum_{i=1}^7 X_{Q_iP} \times C_{Q_iP} + \sum_{i=1}^7 X_{PQ_i} \times C_{PQ_i}$

X_{Q_iP} : distance from quarry Q_i to P (crushing plant)

C_{Q_iP} : hauling cost from quarry Q_i to P (crushing plant)

X_{PQ_i} : distance from P to quarry Q_i

C_{PQ_i} : hauling cost from P to quarry Q_i

e) $Hauling\ granular\ material\ cost = \sum_{i=1}^n X_{PN_i} \times C_{PN_i} + \sum_{i=1}^n X_{N_iP} \times C_{N_iP}$

X_{PN_i} : distance from crushing plant P to construction (node) N_i
 C_{PN_i} : hauling cost from crushing plant P to construction (node) N_i
 X_{N_iP} : distance from N_i to P
 C_{N_iP} : hauling cost from N_i to P

4. Results

This section includes the results of the optimization model presented in the section above. In addition to solving the problem from the case study, the following variations were considered: using a different number of nodes to discretize the model (e.g., from 10 to 1,000), the presence of more than one crushing plant in the project, and the extension length of the highway project. These variations were implemented to assess the sensitivity of the model results to these parameters.

4.1 Optimal Solution with one crushing plant and varying the number of nodes

Table 4 shows the optimal location from the crushing plant and the total cost using from 10 to 1,000 nodes for the 50 kilometers highway project respectively. It can be observed that the optimal location of the crushing plant varies as the number of nodes increase and the total cost as well. However, the variation is minimal. In terms of construction strategy purposes, discretizing

the length of each section with 1,000 nodes, or 50 meters each one is considered detailed enough from a practical standpoint.

Table 4 Optimal location from the crushing plant and total cost using different numbers of nodes (own elaboration)

Number of Nodes	Sections Length (m)	Optimal Location	Total Cost (Minimum)
10	5,000m	15,400	\$4,412,242
20	2,500m	15,400	\$4,481,452
50	1,000m	15,400	\$4,522,978
100	500m	15,600	\$4,537,272
1,000	50m	15,800	\$4,549,857

4.2 Optimal Solution with one crushing plant and varying the length of the project

Another potential variation related to the optimization of the base-course cost in a highway project is related to the length of the project. Therefore, a sensitivity analysis of the influence of the highway length on the optimized cost and location of the crushing plant was performed. **Table 5** shows the results of this sensitivity analysis varying the length of the project between 50 km to 100 km.

Table 5 Optimized Total Cost for Crushing plant location vs. Highway Length (own elaboration)

	50 Km	60 Km	70 Km	80 Km	90 Km	100 Km
15,000	4,579,028	6,352,826	8,468,105	11,003,303	13,866,185	17,104,650
15,200	4,559,580	6,333,383	8,448,667	10,983,872	13,836,462	17,063,026
15,400	4,550,412	6,324,222	8,439,512	10,974,723	13,817,017	17,031,682
15,600	4,550,016	6,323,832	8,438,259	10,970,102	13,803,920	17,009,110
15,800	4,549,857	6,323,678	8,435,043	10,954,988	13,784,933	16,986,775
16,000	4,549,937	6,323,764	8,432,065	10,940,110	13,766,193	16,964,679
16,200	4,550,255	6,324,088	8,429,324	10,925,472	13,747,688	16,942,820
16,400	4,560,249	6,334,088	8,436,259	10,920,510	13,738,858	16,930,638
16,600	4,579,920	6,353,766	8,452,871	10,925,226	13,739,702	16,928,134
16,800	4,599,830	6,373,681	8,469,722	10,930,178	13,740,787	16,925,867
17,000	4,619,977	6,393,834	8,486,812	10,935,370	13,742,114	16,923,838

Table 5, shows that the optimal location of crushing plant moves from 15,800 when the length of the project is 50 kilometers to 17,000 when the length is 100 kilometers. Notably, although the total distance is double, the total cost increases by approximately 3.7 times from \$4,549,857 to \$16,923,838. The primary cause to this disproportionate increase in the cost may be related to the

fact that the location of the plant in the model from where the trucks transport the material to the field remained around the kilometers 15 and 17. As such, trucks need to travel long distances to transport materials to locations beyond the 50th kilometer, consequently, increasing the transportation cost.

4.3 Optimal Solution with two crushing plants

Another interesting variation to run with this model was a situation in which two crushing plants were installed in the construction project. The location of the two different crushing plants was set between the kilometers 14 and 16 for the first plant, and between the kilometers 34 and 36 for the second plant. **Table 6** shows the total cost for the different locations of the two different plants.

Table 6 shows that in this case, the minimum cost is \$3,530,760, which occurs when the plants are located at kilometers 15.4 and 34.8. Notably, the total cost, in this case, is less than the total cost for the case of one crushing plant, which highlights the importance of the transportation cost of the base course material.

Table 6 Optimized total cost vs. Two Crushing Plant Locations (Own elaboration)

		Location from the second crushing plant										
		34,000	34,200	34,400	34,600	34,800	35,000	35,200	35,400	35,600	35,800	36,000
Location of the first crushing plant	14,000	3,596,164	3,594,567	3,590,180	3,583,370	3,577,371	3,579,792	3,584,317	3,588,843	3,594,106	3,600,108	3,606,110
	14,200	3,590,878	3,588,018	3,582,062	3,575,252	3,569,253	3,571,674	3,576,199	3,580,725	3,585,988	3,591,990	3,597,992
	14,400	3,584,329	3,579,756	3,573,800	3,566,990	3,560,991	3,563,412	3,567,937	3,572,463	3,577,726	3,583,728	3,589,730
	14,600	3,580,657	3,576,084	3,570,128	3,563,318	3,557,319	3,559,740	3,564,265	3,568,791	3,574,054	3,580,056	3,586,058
	14,800	3,583,645	3,579,072	3,573,116	3,566,306	3,560,307	3,562,728	3,567,253	3,571,779	3,577,042	3,583,044	3,589,046
	15,000	3,577,234	3,572,661	3,566,705	3,559,895	3,553,896	3,556,317	3,560,842	3,565,368	3,570,631	3,576,633	3,582,635
	15,200	3,560,878	3,556,305	3,550,349	3,543,539	3,537,540	3,539,961	3,544,486	3,549,012	3,554,275	3,560,277	3,566,279
	15,400	3,554,098	3,549,525	3,543,569	3,536,759	3,530,760	3,533,181	3,537,706	3,542,232	3,547,495	3,553,497	3,559,499
	15,600	3,556,192	3,551,619	3,545,663	3,538,853	3,532,854	3,535,275	3,539,800	3,544,326	3,549,589	3,555,591	3,561,593
	15,800	3,559,024	3,554,451	3,548,495	3,541,685	3,535,686	3,538,107	3,542,632	3,547,158	3,552,421	3,558,423	3,564,425
	16,000	3,561,856	3,557,283	3,551,327	3,544,517	3,538,518	3,540,939	3,545,464	3,549,990	3,555,253	3,561,255	3,567,257

5. Discussion

The results of this study suggest the importance of the level of detail in which the length of the highway project is discretized, in other words, the number of nodes used to model the highway. The more nodes are used to describe the highway; the more detailed is the estimated cost of the process. Nonetheless, there must be a balance between how detailed the model needs to be, and the level of practicality to implement the results. Not because the model can use thousands or millions of nodes to find the optimal solution it means is necessary to use such amount of nodes. Moreover, there is a computational cost to do so that in practice becomes more time waiting for the solution of the model. From a practical standpoint, if using hundreds or one thousand nodes the model provides an optimal solution with adequate accuracy for engineers, consequently that alternative should be valid and used. In the case of our study, we suggest that using one thousand nodes to model the project, which means a distance of 50 meters between nodes, it balances detailed information for the model and practicality for engineering

decision making. Our findings and recommendations in this regard are aligned with existing literature in the sense that the information that the model generates must be useful and provide insight to engineers and decision makers dealing with the problem of earthworks to make the best decision possible with the information available (Lima et al., 2012; Marzouk and Moselhi 2004).

In regards to the influence of the length of the project on the optimal solution, in the case study explored, it was interesting to observe that having a project with the double of length, the cost of such project increased approximately 3.7 times. This finding showed a non-proportional relationship between project length and optimal transportation cost. Moreover, this finding emphasized the relevance of the location of the crushing plant in the project, which in our case was limited to be within the first fifty kilometers of the project, thus the longer the project, the longer the distance that trucks had to travel to transport the base course material and with that the cost of transportation. Based on this finding, we explored the impact of having a second

crushing plant in the project. Notably, when adding a second crushing plant to the model, the total cost decreases considerably, in fact, this case reported the lowest optimal cost from all the results presented in this study. This finding reflects that the main component of the model is the cost of the travels between the crushing plant and the final destination in the field. With just one plant, the travels for the trucks that have to go far from the plant are more expensive, because these involve a longer distance. However, adding another crushing plant to the project means that the distances that trucks must travel are minimized, and as such, the total cost of transportation.

Finally, it is important to highlight that as members from the Architectural, Engineering, and Construction industry is always necessary to look for new alternatives and methods to study and deal with the problems in our industry from a scientific standpoint. However, it is also essential to take into account the practicality of the solutions and methods to be implemented during construction projects. That is why studies that combine a robust scientific formulation in the development and solution of the optimization model, but also the use of information and data from real construction projects are relevant to the field. Showing that reaching that equilibrium point between science and practicality is possible, may encourage the development of this type of studies in the future in our community, and also may be used as complementary material while teaching construction engineering and management courses.

6. Conclusions

This paper presents an optimization model based on linear programming of the cost of transportation for base-course material during the construction phase for highway projects. Specifically, the model considered the costs of extracting the base course materials, transporting the material to the crushing plant, crushing the material, transporting and installing the material in the field. The proposed model is implemented in a numerical case study project in South America, namely Peru. Based on the implementation of the model, the influence of how the project length is discretized, where the crushing plant is located, and how many crushing plants are used in the project, are discussed.

The findings from this study emphasize the relevance of the location of the crushing plant during a highway construction project regarding the transportation costs of base course material. Such relevance was corroborated by adding more crushing plants to the project of the case study, and as such, the total cost of transporting the base course material decreased, it was the lowest transportation cost reported in this study. Therefore, knowledge of the relevance of where to locate the crushing plant in the field, and practical tools to calculate the

costs associated with the transportation of base course material can help decision-makers in planning earthworks for a highway project. One limitation of this study is the linear structure from the model costs, and in reality, these relationships may be non-linear. However, such non-linearity would require higher and more expensive computational power. Future work can investigate accounting for non-linear cost structures of the model and include variability to the input parameters to address uncertainty considerations as part of improving the proposed model.

7. Acknowledgements

Conicyt supported this study by the program Becas Chile grant number 72170369.

8. References

- [1] Bogenberger, C., Dell'Amico, M., Fuellerer, G., Hoefinger, G., Iori, M., Novellani, S., and Panicucci, B. (2015). "Two-Phase Earthwork Optimization Model for Highway Construction." *J. Constr. Eng. Manage.*, 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000973, 05015003.
- [2] de Lima, R. X., Júnior, E. F. N., Prata, B. D. A., & Weissmann, J. (2012). Distribution of materials in road earthmoving and paving: Mathematical programming approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(8), 1046-1054.
- [3] Dell'Amico, M., Fuellerer, G., Höfinger, G., Iori, M., & Novellani, S. (2016). A Decision Support System for Highway Construction: The Autostrada Pedemontana Lombarda. *Interfaces*, 46(3), 245-263.
- [4] Habitat, U. N. (2016). Urbanization and development emerging futures. *World cities report*.
- [5] Henderson, D., Vaughan, D. E., Jacobson, S. H., Wakefield, R. R., & Sewell, E. C. (2003). Solving the shortest route cut and fill problem using simulated annealing. *European Journal of Operational Research*, 145(1), 72-84.
- [6] Kim, H., Chen, Z., Cho, C. S., Moon, H., Ju, K., & Choi, W. (2015). Integration of BIM and GIS: Highway cut and fill earthwork balancing. In *Computing in Civil Engineering 2015* (pp. 468-474).
- [7] Lin, C. T., Hsie, M., Hsiao, W. T., Wu, H. T., & Cheng, T. M. (2011). Optimizing the schedule of dispatching earthmoving trucks through genetic algorithms and simulation. *Journal of performance of constructed facilities*, 26(2), 203-211.
- [8] Liu, C., & Lu, M. (2014). Optimizing earthmoving job planning based on evaluation of temporary haul road networks design for mass earthworks projects. *Journal of construction engineering and management*, 141(3), 04014082.



- [9] Marzouk, M., and Moselhi, O. (2004). "Multiobjective optimization of earthmoving operations." *J. Constr. Eng. Manage.*, 10.1061/(ASCE) 0733-9364(2004)130:1(105), 105–113.
- [10] Mayer, R. H., and Stark, R. M. (1981). "Earthmoving logistics." *J. Constr. Div.*, 107(2), 297–312.
- [11] Mohamad Karimi, S., Jamshid Mousavi, S., Kaveh, A., and Afshar, A. (2007). "Fuzzy Optimization Model for Earthwork Allocations with Imprecise Parameters." *J. Constr. Eng. Manage.*, 10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:2(181), 181-190.
- [12] Moselhi, O., and Alshibani, A. (2009). "Optimization of earthmoving operations in heavy civil engineering projects." *J. Constr. Eng. Manage.*, 10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:10(948), 948–954.
- [13] Nassar, K., Aly, E. A., and Osman, H. (2011). "Developing an efficient algorithm for balancing mass-haul diagrams." *Autom. Constr.*, 20(8), 1185 – 1192.
- [14] Oberlender, G., & Peurifoy, R. L. (1991). *Estimating Construction Costs*.
- [15] Stark, R. M., and Mayer, R. H. (1983). *Quantitative construction management: Uses of linear optimization*, Wiley, New York.
- [16] Tanoli, W. A., Seo, J. W., Sharafat, A., & Lee, S. S. (2018). 3D Design Modeling Application in Machine Guidance System for Earthwork Operations. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(12), 4779-4790.
- [17] Yi, C., & Lu, M. (2016). A mixed-integer linear programming approach for temporary haul road design in rough-grading projects. *Automation in Construction*, 71, 314-324.

Análisis del flujo transitorio usando esquemas numéricos explícitos e implícitos en una malla espacio-tiempo no uniforme.

Transient flow analysis using explicit and implicit numerical schemes in a non-uniform time-space mesh.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido

04-12-2018

Aceptado

08-04-2019

Publicado

29-04-2019

Palabras Clave:

Golpe de ariete

Método de diferencias

finitas implícito (MDFI)

Método de las
características (MC)

Red de tuberías

Article history:

Received

04-12-2018

Accepted

08-04-2019

Available

29-04-2019

Keywords:

Water hammer

Implicit finite-difference
method (IFDM)

Method of
characteristics (MOC)

Pipe network

Resumen

El método de características (MC) es un algoritmo útil y eficaz para la modelación del flujo transitorio en todos los tipos de sistemas, constituyendo una herramienta atractiva dado su nivel de precisión numérica y estabilidad. Sin embargo, surge un problema cuando es necesario discretizar la red para cumplir con Courant en todas las tuberías, una situación que puede ser crítica cuando la red tiene uno o más tramos de longitud relativamente corta donde puede ser imposible cumplir con Courant, reduciendo el tamaño del paso de tiempo con riesgo de ralentizar el tiempo de ejecución del algoritmo de golpe de ariete. Esta situación puede volverse crítica cuando la red tiene uno o más conductos de longitud relativamente corta, donde puede ser imposible cumplir con Courant. Es posible resolver este problema utilizando métodos numéricos que funcionan con discretizaciones no uniformes y flexibles, esto junto con expresiones matemáticas que permiten abordar de manera eficiente el problema de las tuberías excesivamente cortas, lo que permite calcular las variables de estado transitorias sin la necesidad de cumplir con Courant. Se concluye que las metodologías con discretización no uniforme y flexible son fáciles de programar y permiten evitar el efecto de Courant, permitiendo obtener resultados comparables al resultado exacto sin incurrir en un gasto significativo de recursos computacionales (memoria y tiempo de ejecución)

Abstract

Method of characteristics (MOC) is a useful and effective algorithm for transient flow modelling in all types of systems, constituting an attractive tool given its level of numerical accuracy and stability. However, a problem arises when it is necessary to discretize the network in order to comply with Courant in all pipelines, a situation that can become critical when the network has one or more pipes of relative short length that can reduce the size of the computational time step, with the risk of slowing down the execution time of the water hammer algorithm. This situation can become critical when the network has one or more pipes of relative short length, where it may become impossible to comply with Courant. It is possible to solve this problem using numerical methods that work with non-uniform and flexible discretizations, this together with mathematical expressions that allow efficiently address the problem of excessively short pipes, allow calculating the transitory state variables without the need to comply with Courant. It is concluded that the methodologies with non-uniform and flexible discretization are easy to program and allow avoid the Courant effect, which allows obtaining results comparable to the exact result without incurring a significant expenditure of computational resources (memory and execution time).

J. Twyman¹

¹Twyman Ingenieros Consultores, Rancagua, Chile.
john@twyman.cl, teléfono: +56-9-89044770.

1. Introducción

El método de las características (MC) es un algoritmo numérico ideado para simular y/o analizar los efectos transitorios en un sistema hidráulico a presión, el cual puede tener una forma ramificada, mallada o mixta. En la fase de diseño el MC permite incorporar al sistema diferentes dispositivos de protección de manera que las oscilaciones de presión generadas por diferentes maniobras de los elementos del sistema se mantengan dentro de determinados límites previamente fijados. Por otra parte, en la fase de verificación el MC permite visualizar los efectos transitorios al efectuar maniobras en una instalación previamente diseñada. Sin embargo, pese a estas ventajas, el MC es poco flexible frente al problema de discretización que se presenta cuando se debe resolver el flujo transitorio en redes que poseen tuberías con menor longitud relativa y/o distinto material, lo cual le resta versatilidad y mayor campo de aplicación. Este punto es comprobado al comparar el desempeño numérico del MC con dos algoritmos de solución con similar nivel de precisión aunque con un menor gasto de recursos computacionales en ciertos casos.

2. Material y métodos

2.1 Ecuaciones que gobiernan el flujo transitorio

El flujo transitorio en tuberías puede describirse según (Nerella y Rathnam, 2015):

$$gA_p \frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$gA_p \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{f}{2DA_p} Q|Q| = 0 \quad (2)$$

Donde (1) corresponde a la ecuación de continuidad y (2) a la ecuación de conservación del momentum, con g = constante de gravedad (m/s^2), A_p = sección transversal de la tubería (m^2), H = cota piezométrica (m), Q = caudal (m^3/s), f = factor de fricción de la tubería (Darcy, adimensional) y D = diámetro interno de la tubería (m). Además, a = velocidad de la onda (m/s) = $\sqrt{K/\rho}/\sqrt{1+K/E \cdot D/e \cdot \psi}$, siendo K = módulo de compresibilidad del fluido (kg/ms^2), ρ = densidad del fluido (kg/m^3), E = módulo de elasticidad del material componente de la tubería (kg/ms^2), e = espesor de la pared de la tubería (m) y ψ = factor que depende de la condición de apoyo de la tubería (adimensional) (Twyman, 2016b, 2017a, b; Wylie y Streeter, 1978). Las variables x y t denotan espacio y tiempo.

2.2 Discretización de la red

El MC tradicional debe cumplir con la denominada condición de Courant (C_r) que establece que $C_r = a \cdot \Delta t = (L_p/N) = \Delta x$ (m), con Δt = paso de tiempo (s), L_p = longitud de la tubería (m), N = cantidad de sub-tramos en la que está dividida la tubería (= $L_p/\Delta x$) adimensional, y Δx = longitud del sub-tramo (m). Siendo que la mayoría de los sistemas se componen de tuberías con diferentes L_p y a , se torna imposible satisfacer exactamente C_r en todas las tuberías utilizando un valor común (y razonable) de Δt (Karney y Ghidaoui, 1997), generándose con esto un problema de discretización (Boulos et al., 2005). Existen tres formas generales de lidiar con este problema: (1) realizar ajustes hasta conseguir que $C_r = 1,0$, ya sea modificando a en una proporción menor o igual a $\pm 15\%$ (Wylie y Streeter, 1978; Twyman, 2016a), o modificando L_p hasta un valor de referencia (Wood, 2005); (2) reemplazar los tramos cortos por elementos de reemplazo (Wylie y Streeter, 1978); o (3) aplicar esquemas más precisos que el MC cuyo desempeño dependa en menor medida de C_r , y por ende, de la discretización adoptada, como por ejemplo (Watt et al., 1980; Chaudhry, 1982; Salgado et al., 1993a, b; Twyman et al., 1997; Samani y Khayatzadeh, 2002; Izquierdo et al., 2004a, b; Wood et al., 2005; Chen et al., 2013): métodos de diferencias finitas (de tipo explícito o implícito, en primer orden o superior), métodos de elementos finitos, métodos híbridos o multidireccionales, método de elementos de borde (o de contorno), métodos espectrales, pseudo-espectrales o súper espectrales, Método de la Onda, etcétera.

2.3 Método de las características (MC)

En este método las ecuaciones (1) y (2), expresadas en forma de ecuaciones diferenciales parciales de tipo hiperbólico, son transformadas en ecuaciones diferenciales ordinarias que pueden ser expresadas como dos ecuaciones de compatibilidad denominadas líneas características C^+ y C^- (Figura 1), cuya forma es la siguiente:

$$\frac{Q_P^{t+\Delta t} - Q_L}{A_p \Delta t} + \frac{g}{a} \frac{H_P^{t+\Delta t} - H_L}{\Delta t} + \frac{f Q_L |Q_L|}{2DA_p^2} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{Q_P^{t+\Delta t} - Q_R}{A_p \Delta t} - \frac{g}{a} \frac{H_P^{t+\Delta t} - H_R}{\Delta t} + \frac{f Q_R |Q_R|}{2DA_p^2} = 0 \quad (4)$$

Escogiendo un Δt tal que los puntos L y R queden cercanos a los nudos $i-1$ e $i+1$, respectivamente, es posible aplicar un procedimiento de interpolación en orden a calcular los valores de Q y H en los puntos L y R , con lo cual se tiene lo siguiente:

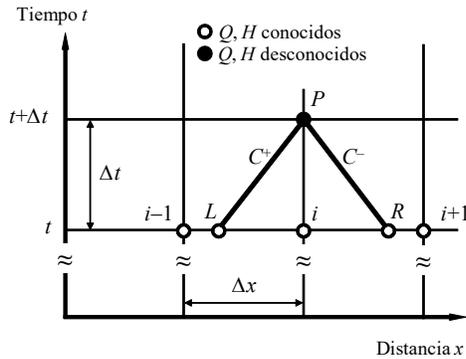


Figura 1 Malla del MC.

2.4 Método de diferencias finitas implícito. (MDFI)

El MDFI es usado para resolver el flujo transitorio cuando es necesario adoptar pasos de tiempo que no están restringidos por la condición de Courant (Arfaie y Anderson, 1991). En el MDFI, las incógnitas H y Q pueden ser expresadas en términos de valores desconocidos pertenecientes a nudos cercanos dentro de la malla $x-t$ (Chaudhry, 1982). De esta forma, ecuaciones representativas del sistema completo pueden ser resueltas simultáneamente. Tomando en cuenta la **Figura 2**, puede suponerse que las condiciones en t son conocidas y se requiere calcular los valores en el tiempo $t + \Delta t$. Al reemplazar las derivadas parciales de las ecuaciones (1) y (2) por aproximaciones en diferencias finitas y simplificando (Chaudhry, 1982), se obtiene lo siguiente cuando los factores de ponderación del MDFI son iguales a 0,5 ($i = 2, \dots, N - 1$):

$$Q_L = Q_i^t + C_r(Q_{i-1}^t - Q_i^t) \quad (5)$$

$$Q_R = Q_i^t + C_r(Q_{i+1}^t - Q_i^t) \quad (6)$$

$$H_L = H_i^t + C_r(H_{i-1}^t - H_i^t) \quad (7)$$

$$H_R = H_i^t + C_r(H_{i+1}^t - H_i^t) \quad (8)$$

$$d_1 Q_i^{t+\Delta t} + d_2 Q_{i+1}^{t+\Delta t} - d_3 H_i^{t+\Delta t} + d_3 H_{i+1}^{t+\Delta t} = -d_4 \quad (11)$$

$$-c_1 Q_i^{t+\Delta t} + c_1 Q_{i+1}^{t+\Delta t} + c_2 H_i^{t+\Delta t} + c_3 H_{i+1}^{t+\Delta t} = -c_4 \quad (12)$$

Con i variando entre los nudos internos $i = 2$ e $i = N$. Reemplazando las ecuaciones anteriores en (3) y (4), y resolviendo el sistema de ecuaciones resultante, se obtiene:

$$Q_P^{t+\Delta t} = \frac{1}{2} \left[(Q_L + Q_R) + \frac{gA_P}{a} (H_L - H_R) - \frac{f\Delta t}{2D} (Q_L|Q_L| + Q_R|Q_R|) \right] \quad (9)$$

$$H_P^{t+\Delta t} = \frac{1}{2} \left[\frac{a}{gA_P} (Q_L - Q_R) + (H_L + H_R) - \frac{a}{gA_P} \frac{f\Delta t}{2D} (Q_L|Q_L| - Q_R|Q_R|) \right] \quad (10)$$

Las ecuaciones (9) y (10) son válidas para calcular las variables de estado $Q_P^{t+\Delta t}$ y $H_P^{t+\Delta t}$ en los nudos internos de la tubería. Cuando $C_r < 1,0$, el MC queda impedido de capturar los frentes de onda abruptos, entregando una solución suave o con amortiguaciones numéricas de tipo artificial (Goldberg y Wylie, 1983), todo lo cual tiende a modificar la física del problema y transformar en forma significativa las ecuaciones que gobiernan el flujo transitorio (Ghidaoui y Karney, 1994). Cuando $C_r = 1,0$ el MC entrega un resultado numéricamente exacto al capturar fielmente los frentes de onda abruptos, sin suavizarlos ni amortiguarlos numérica o artificialmente.

Donde:

$$d_1 = 1 - \frac{\Delta t(Q_i^t + Q_{i+1}^t)}{2A_P\Delta x} + \frac{f\Delta t|Q_i^t + Q_{i+1}^t|}{4DA_P} \quad (13)$$

$$d_2 = 1 + \frac{\Delta t(Q_i^t + Q_{i+1}^t)}{2A_P\Delta x} + \frac{f\Delta t|Q_i^t + Q_{i+1}^t|}{4DA_P} \quad (14)$$

$$d_3 = \frac{gA_P\Delta t}{\Delta x} \quad (15)$$

$$d_4 = \frac{gA_P\Delta t(H_{i+1}^t - H_i^t)}{\Delta x} - (Q_i^t + Q_{i+1}^t) + \frac{\Delta t}{2A_P\Delta x} (Q_i^t + Q_{i+1}^t)[Q_{i+1}^t - Q_i^t] \quad (16)$$

$$c_1 = \frac{a^2}{2\Delta x} \quad (17)$$

$$c_2 = \frac{gA_P}{2\Delta t} - \frac{g(Q_i^t + Q_{i+1}^t)}{4\Delta x} \quad (18)$$

$$c_3 = \frac{gA_P}{2\Delta t} + \frac{g(Q_i^t + Q_{i+1}^t)}{4\Delta x} \quad (19)$$

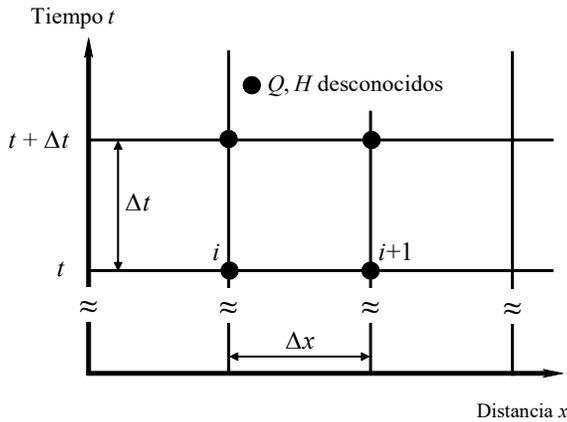


Figura 2 Malla del MDFI.

$$c_4 = \left(\frac{-gA_p}{2\Delta t} \right) [H_{i+1}^t + H_i^t] + \frac{g}{4\Delta x} (Q_i^t + Q_{i+1}^t) [H_{i+1}^t - H_i^t] + \frac{a^2}{2\Delta x} [Q_{i+1}^t - Q_i^t] \quad (20)$$

Con: Q_i^t y Q_{i+1}^t , H_i^t y H_{i+1}^t caudales y cotas piezométricas en los nudos internos i e $i+1$ en el instante previo t . En las ecuaciones (11) y (12) existen 4 incógnitas ($Q_i^{t+\Delta t}$ y $Q_{i+1}^{t+\Delta t}$, $H_i^{t+\Delta t}$ y $H_{i+1}^{t+\Delta t}$), por lo que se requieren 4 ecuaciones para obtener una solución única. Hay dos ecuaciones adicionales que corresponden a las secciones adyacentes $i-1$ e $i+1$. Si el sistema es dividido en N sub-tramos, entonces habrá $N+1$ secciones o puntos. Debido a que existen dos incógnitas por cada sección de tubería ($Q_i^{t+\Delta t}$ y $H_i^{t+\Delta t}$) ($i = 1, 2, \dots, N+1$), habrá entonces $2 \cdot (N+1)$ incógnitas, para lo cual la solución única requerirá una cantidad acorde de ecuaciones. De estas, $2N$ son provistas por las ecuaciones (11) y (12) para cada sub-tramo, y las restantes dos ecuaciones son provistas por las condiciones de borde en los extremos de la tubería, cuyo tratamiento será abordado en el siguiente apartado en el contexto del MC. El MDFI posee varias ventajas: no requiere interpolar, es incondicionalmente estable y puede funcionar con $C_r \neq 1,0$. Tiene como desventaja su propensión a mostrar oscilaciones espurias en transitorios muy rápidos y dispersión numérica en ciertos casos; y además, el paso de tiempo no puede ser incrementado en forma arbitraria porque esto podría afectar la validez de reemplazar las derivadas parciales por aproximaciones en diferencias finitas (Chaudhry, 1982).

2.5 Tratamiento de las condiciones de borde

Karney (1984), Karney y McInnis (1992), Salgado et al. (1993a, b), Twyman (2017b) y Nault et al. (2018) presentan, en el contexto del MC, una ecuación válida para modelar distintas condiciones de borde que mantienen la continuidad de los caudales a nivel nodal y la unicidad de la cota piezométrica en cada nudo. En una red con nudos simples, estanques y válvulas, las siguientes ecuaciones pueden ser aplicadas para calcular $H_p^{t+\Delta t}$ en los nudos de borde (1 y $N+1$).

Nudo simple. Es aquel que conecta sólo tuberías, excluyendo bombas, estanques, etcétera, es decir, sólo hay tubos que llegan y otros que salen del nudo (Figura 3), además de consumos o aportes conocidos (Q_{ext}). Si no hay pérdida de carga en el nudo, entonces la cota piezométrica puede ser representada por un valor único $H_p^{t+\Delta t}$, cuya forma es:

$$H_p^{t+\Delta t} = C_c - B_c \cdot Q_{ext} \quad (21)$$

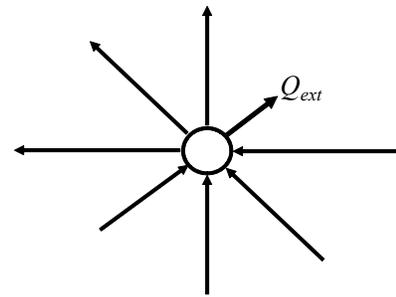


Figura 3 Esquema de un nudo simple (adaptado de Karney, 1984).

Con C_c y B_c constantes conocidas que dependen de valores calculados en el paso de tiempo anterior.

Estanque lineal. En este caso se plantea una ecuación similar a la del nudo simple (Figura 4):

$$H_p^{t+\Delta t} = C_c - B_c \cdot \left[\frac{C_c - H_0 - B_0 \cdot Q_e}{B_c + B_0} \right] \quad (22)$$

Donde H_0 = cota piezométrica del estanque, $B_0 = \Delta t / 2A_r$ con A_r = sección transversal del estanque y Q_e = consumo nodal del paso de tiempo anterior. Se verifica que la ecuación (22) es general, porque cuando $A_r \rightarrow \infty$ $B_0 \rightarrow 0$, con lo cual se obtiene $H_p^{t+\Delta t} = H_0$, que corresponde a la presión en el estanque de cota o nivel constante.

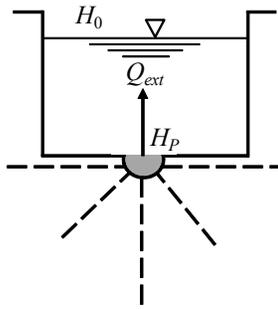


Figura 4 Esquema de un estanque lineal (adaptado de Karney, 1984).

Válvula de cierre gradual. En este caso se considera un elemento con dos nudos (Figura 5), donde:

$$H_p^{t+\Delta t} = C_c - B_c \cdot s \cdot \tau \cdot E_s \cdot \sqrt{s(H_p^t - H_b)} \quad (23)$$

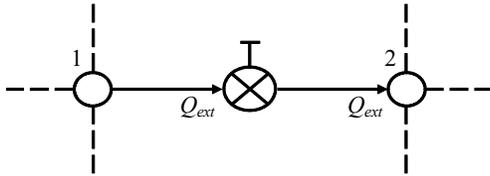


Figura 5 Esquema de la válvula (adaptado de Karney, 1984).

Con s = signo del caudal externo; τ y E_s = parámetros asociados a la válvula, H_p^t = cota piezométrica en el nudo P en el tiempo t y H_b = cota piezométrica conocida cuando la válvula descarga a la atmósfera o cuando existe un orificio a la entrada de un estanque de cota constante. Las ecuaciones (21), (22) y (23) permiten que una red compleja, compuesta por nudos simples, estanques y válvulas, pueda ser desacoplada o desarticulada en cada nudo de borde, siempre y cuando se agregue como condición de borde una ecuación de compatibilidad (las ecuaciones 21, 22 o 23, dependiendo del caso) que restituya la continuidad de caudales y la unicidad de la cota piezométrica (Salgado, 1992; Twyman et al., 1997; Twyman, 2016a). Esta propiedad, que será utilizada en todos los esquemas numéricos presentados en este trabajo, permite simplificar notablemente el tratamiento de los nudos de borde en redes con conectividad compleja, aunque también permite resolver la red tubería-a-tubería, quedando estas susceptibles de ser resueltas mediante distintos métodos numéricos (Salgado et al., 1993b; Twyman et al., 1997). En este caso se adopta al MC como esquema de solución de los nudos de borde debido a que corresponde al camino más fácil de implementar, tal como ha sido reportado por Chaudhry (1979), Karney (1984), Chaudhry y Hussaini (1985), Karney y McInnis (1992), y Twyman (2017b).

2.6 Solución usando el MDFI

En el contexto del MDFI, es posible unir las ecuaciones de los nudos de borde (21), (22) o (23) y las ecuaciones (11) y (12), correspondientes a cada sub-tramo de la tubería, en forma matricial, tal como sigue:

$$A \cdot y = b \quad (24)$$

Donde y es un vector que incluye las variables $Q_i^{t+\Delta t}$ y $H_i^{t+\Delta t}$, con $i = 1, 2, \dots, N + 1$, b es un vector con los coeficientes c_4 y d_4 para cada nudo interno y para las condiciones de borde impuestas en los nudos de borde aguas arriba y aguas abajo de la tubería, y A es una matriz que incluye los coeficientes d_1, d_2, d_3, c_1, c_2 y c_3 . La matriz A puede resolverse en forma rápida y eficiente mediante el algoritmo de barrido doble, conocido también como algoritmo de Thomas (Twyman, 2017a). Para efectos ilustrativos, se considerará un sistema compuesto por un estanque de cota constante (aguas arriba), una tubería y una válvula de cierre instantáneo (aguas abajo) – ver Figura 6. La tubería será dividida en 5 sub-tramos ($N = 5$), de forma que haya $N + 1$ ($= 6$) nudos y 12 incógnitas. Por tanto, la obtención de una solución única pasará por resolver un sistema compuesto por 12 ecuaciones (Figura 7). Diez de esas ecuaciones serán obtenidas a partir de las ecuaciones (11) y (12) aplicadas en los sub-tramos 1 al 5. Una ecuación adicional saldrá de la condición de borde aguas arriba correspondiente al estanque de cota constante (Ecuación 22) ubicada en el nudo de borde 1, donde $H_1^{t+\Delta t} = H_0^{t+\Delta t}$, con $H_0^{t+\Delta t}$ = altura de la superficie de agua del estanque. La segunda ecuación adicional sale de especificar que en el nudo de borde aguas abajo $H_6^{t+\Delta t} = C_c = H_{val}^{t+\Delta t}$, con $H_{val}^{t+\Delta t}$ = cota piezométrica correspondiente a la válvula de cierre instantáneo; es decir, con $\tau = 0$ al inicio del transitorio (Ecuación 23). En caso de suponer que la válvula tiene un cierre gradual, entonces se deben especificar los parámetros incluidos en la Ecuación (23). Las ecuaciones algebraicas resultantes son mostradas en la Figura 7, donde los coeficientes $d_1, d_2, d_3, d_4, c_1, c_2, c_3$ y c_4 pueden variar de un sub-tramo a otro.

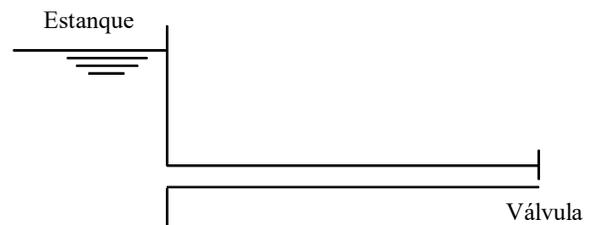


Figura 6 Esquema de la red ejemplo.

de a para mantener su estabilidad cuando $C_r < 1,0$; y es totalmente explícito.

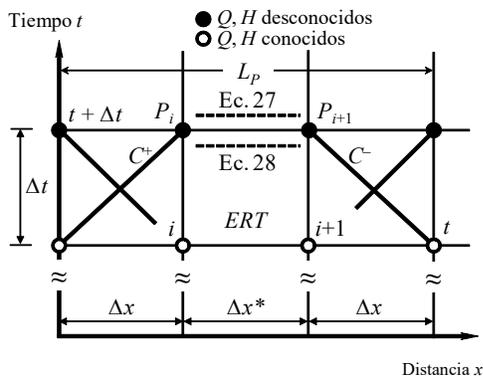


Figura 9 Esquema del MCERT para una tubería con $C_r < 1,0$ y discretizada con N sub-tramos.

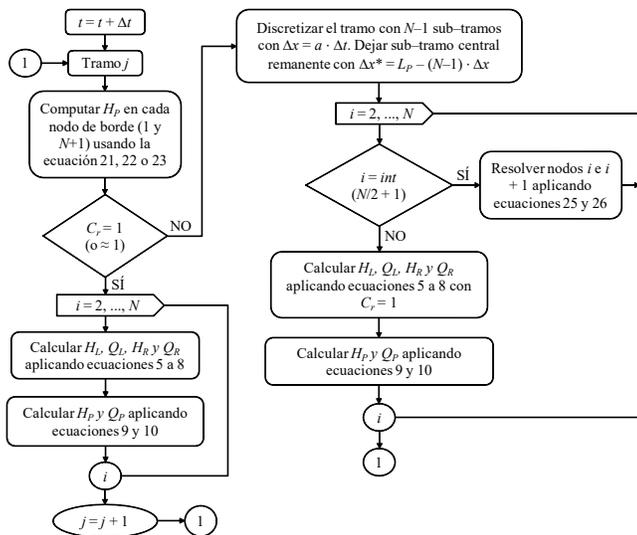


Figura 10 Flujo del esquema de solución que incorpora al MCERT.

Entre sus desventajas destacan: dada la forma como discretiza las tuberías, necesariamente debe trabajar en tramos con un N mínimo ≥ 3 ; el sub-tramo central (ERT), al ser derivado desde un esquema de 2do. orden (MDFI), puede generar oscilaciones espurias al modelar transitorios rápidos.

3. Resultados

3.1 Ejemplo de aplicación 1

Se considera una red simple (Figura 11a) compuesta por un estanque (D1) de gran diámetro ubicado en el extremo aguas arriba del sistema ($H_0 = 100$ m), tres tuberías (T1, T2 y T3)

conectadas en serie de material acero (T1 y T3) y PVC rígido (T2), y una válvula de regulación (Rg1) ubicada en el extremo aguas abajo, con tiempo de cierre de 1 s (Figura 11b). El caudal inicial es $Q_0 = 134,76$ (L/s). Todos los nudos tienen cota $Z = 0$ (m). Las longitudes de T1, T2 y T3 son 3.500, 500 y 4.000 (m), respectivamente, y sus diámetros internos corresponden a $D_{int} = 500$ (mm). La velocidad de onda de T1 y T3 es igual a 1.002,1 (m/s), y la de T2 es igual a 163,9 (m/s). En este caso, la solución transitoria según el MC será obtenida aplicando el software comercial Allievi (más detalles en www.allievi.net).

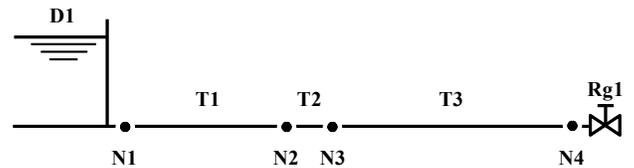


Figura 11a Esquema de la red ejemplo 1 (sin escala).

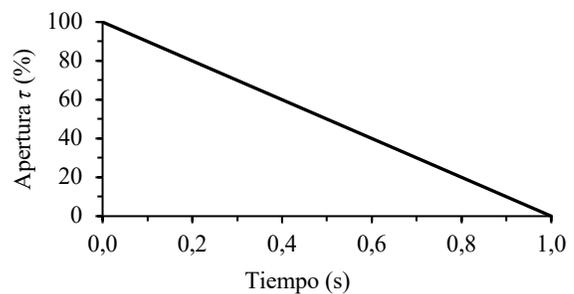


Figura 11b Curva de cierre de la válvula (Rg1) en función del tiempo.

Discretización de la red 1 usando el MC. La red será discretizada de forma de evitar un ajuste en el valor original de a superior a $\pm 0,5\%$ en orden a conseguir que $C_r = 1,0$ en todas las tuberías. Esto se consigue iterando el valor de Δt y analizando lo que sucede en cada caso, donde para cada situación se propone un valor alternativo para a o una indicación sobre la longitud que debiera adoptar el tramo que está dificultando la discretización de la red. Después de un proceso de prueba y error, se consigue un $C_r = 1,0$ para cada tubería del sistema con $\Delta t = 0,05$ (s) y N igual a 70, 61 y 80 para T1, T2 y T3, respectivamente.

Solución transitoria. Se verifica el desempeño numérico de MDFI y MCERT considerando una discretización distinta a la establecida por el MC, con $N = 5, 5$ y 6 para T1, T2 y T3, respectivamente, dejando inalterados los valores originales de a . Dado lo anterior, el paso de tiempo Δt queda igual a 0,61012813 (s). El **MÉTODO I** trabaja considerando $\Delta x = a \cdot \Delta t$ para los sub-tramos adyacentes a los nudos de borde 1 y $N + 1$ de cada tubería (quedando $\Delta x = 611,41$ m para T1 y T3, y $\Delta x = 100,00$ m para T2), y $\Delta x' =$

$(L_p - 2 \cdot a \cdot \Delta t) / (N - 2)$ para los sub-tramos restantes internos ($\Delta x' = 759,06$ m para T1, $\Delta x' = 100,00$ m para T2 y $\Delta x' = 694,29$ m para T3). Esto permite al método I calcular Q y H en los nudos de borde mediante el MC sin necesidad de aplicar interpolaciones. En este caso el MDFI resuelve un sistema de ecuaciones de tamaño $2(N + 1)$ por cada tramo y en cada Δt . Dicho sistema es construido tomando en cuenta los nudos de borde de cada tramo (ecuaciones 21, 22 o 23, según sea el caso), junto con las ecuaciones (11) y (12), válidas para resolver los nudos internos pertenecientes a cada sub-tramo de cada tubería. Esto se aplica independientemente del valor que tenga C_r en cada tramo. En el **MÉTODO II** se aplica un procedimiento de discretización diferente dependiendo del número de Courant asignado a la tubería. Si el tramo tiene un $C_r = 1,0$, se aplica el MC con la tubería discretizada con $\Delta x = L_p / N$, con lo cual en T2 se tendría $\Delta x = 100$ (m). En cambio, si la tubería tiene un $C_r < 1,0$ entonces se re-discretiza el tramo definiendo $(N - 1)$ sub-tramos con $\Delta x = a \cdot \Delta t$, dejando el sub-tramo remanente con $\Delta x^* = L_p - (N - 1) \cdot \Delta x$. En este caso, al calcular los valores en T1 y T3 se obtiene: $\Delta x = 611,41$ (m), con $\Delta x^* = 1.054,36$ m (T1) y $\Delta x^* = 942,95$ m (T3). Los nudos pertenecientes a los sub-tramos con Δx se resuelven vía el MC, y los nudos pertenecientes al sub-tramo remanente con Δx^* se resuelven vía el ERT. Las **Figuras 12a** y **12b** muestran un comparativo de la presión en función del tiempo en N4 según MC y los métodos I y II.

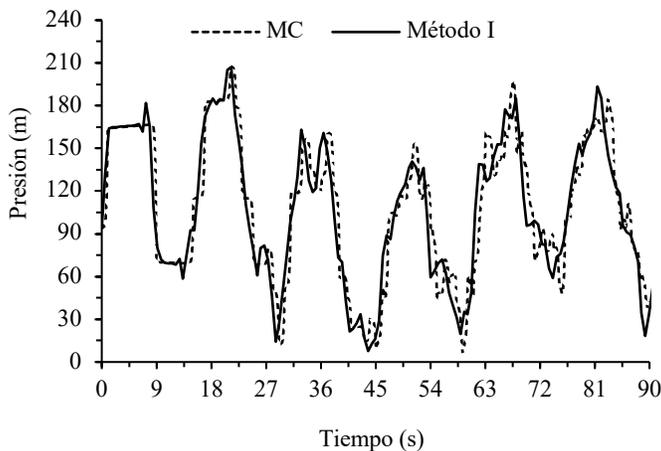


Figura 12a Curva de presión en función del tiempo en N4 cuando la red es resuelta mediante el MC y el método I.

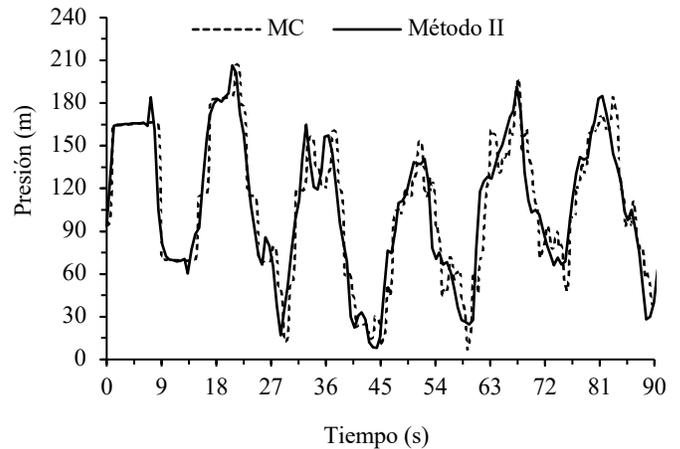


Figura 12b Curva de presión en función del tiempo en N4 cuando la red es resuelta mediante el MC y el método II.

La **Tabla 1** muestra un comparativo de las presiones extremas calculadas por el MC y los métodos I y II. La **Tabla 2** muestra el tiempo de ejecución gastado por cada método para llegar a la solución cuando el tiempo máximo de simulación ($T_{m\acute{a}x}$) es igual a 90 (s). Los esquemas fueron corridos en un PC estándar de 64 bits con velocidad de procesamiento de 1,40 (GHz).

Tabla 1 Comparación de presiones extremas entre MC y los métodos I y II.

Presión extrema	Método			Error (m)	
	MC	I	II	I	II
Máxima (m)	+207,4	+207,1	+206,5	-0,3	-0,9
Mínima (m)	+6,6	+7,7	+8,2	+1,1	+1,6

Tabla 2 Tiempos de ejecución del MC y de los métodos I y II.

Método	Tiempo de Ejecución (s)
MC	14,0
I	1,6
II	0,3

A partir de las **Figuras 12a** y **12b**, y de las **Tablas 1** y **2**, se verifica que los métodos I y II registran un buen desempeño numérico al comparar la forma de las curvas de presión en función del tiempo y las presiones extremas, siendo además mucho más rápidos que el MC, con el mérito adicional de funcionar de manera estable y relativamente precisa con valores de N significativamente menores, lo cual les permite trabajar con Δt mayores y lo más importante: sin necesidad de modificar los valores de a o L originalmente establecidos. El mérito del método II es que se trata de un esquema 100% explícito.

3.2 Ejemplo de aplicación 2

Se considera la red de la **Figura 13a**, compuesta por un estanque (D1) de gran diámetro ubicado en el extremo aguas arriba del sistema, con cota inicial del agua $H = 70$ (m), 26 tuberías (T1, T2, etcétera) interconectadas (**Tabla 3**) y una válvula de regulación (Rg1) ubicada en el extremo aguas abajo de la tubería T26, con un tiempo de cierre de 6,0 s (**Figura 13b**).

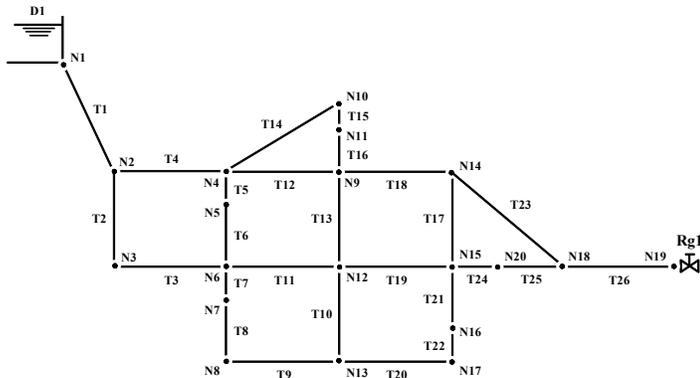


Figura 13a. Esquema de la red ejemplo 2 (sin escala).

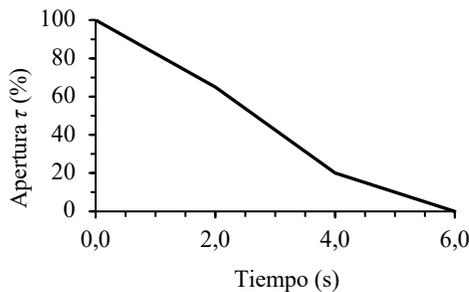


Figura 13b. Curva de cierre de la válvula (Rg1) en función del tiempo.

Tabla 3 Datos de las tuberías (acero) de la red ejemplo 2.

Tubería	L_p (m)	D_{int} (mm)	f (Darcy)	a_0 (m/s)
T1	150	200	0,018	1.005,84
T2	150	200	0,019	1.143,00
T3	150	200	0,019	1.219,20
T4	150	200	0,018	914,40
T5	25	200	0,022	1.143,00
T6	125	200	0,022	975,40
T7	30	200	0,020	957,10
T8	200	200	0,020	914,40
T9	150	200	0,020	1.005,80
T10	230	200	0,027	1.005,80

T11	150	200	0,019	1.005,80
T12	150	200	0,019	914,40
T13	150	200	0,022	1.005,80
T14	250	200	0,020	975,40
T15	80	200	0,020	1.005,80
T16	120	200	0,020	1.005,80
T17	150	200	0,023	1.005,80
T18	150	200	0,019	1.143,00
T19	150	200	0,019	1.005,80
T20	150	200	0,020	1.219,20
T21	150	200	0,020	1.005,80
T22	80	200	0,020	1.005,80
T23	250	200	0,018	914,40
T24	50	200	0,018	1.005,80
T25	150	200	0,018	1.005,80
T26	450	200	0,018	975,40

Todos los nudos tienen cota $Z = 0$ (m). $T_{máx} = 60$ (s).

Discretización de la red 2 usando el MC. La red será discretizada de forma de evitar un ajuste en el valor original de a_0 superior a $\pm 15\%$ en orden a conseguir que $C_r = 1,0$ en todas las tuberías, con lo cual se obtiene $\Delta t = 0,02186653$ (s) y N según la **Tabla 4**. La única excepción la constituye la tubería 7 donde la variación de a_1 (nuevo valor ajustado) fue de -43% , situación que no debiera representar un problema significativo en la calidad de los resultados. El resultado arrojado por el MC mediante esta discretización será considerado exacto para efectos de comparación con otros esquemas numéricos.

Tabla 4 N y Courant según MC y métodos I y II (ejemplo 2).

Tubería	N MC	a_1 (m/s)	N Métodos I, II	Courant Método I	Courant Método II
T1	7	977	3	0,57	0,57
T2	6	1.142	3	0,77	0,77
T3	6	1.142	3	0,91	0,97
T4	7	978	4	0,94	0,97
T5	1	1.143	1	1,82	1,82
T6	6	953	3	0,82	0,82
T7	1	1.371	1	1,27	1,27
T8	10	914	5	0,86	0,67
T9	7	979	3	0,57	0,57

T10	10	1.052	5	0,80	0,57
T11	7	979	3	0,57	0,57
T12	7	979	4	0,94	0,97
T13	7	980	3	0,57	0,57
T14	12	952	6	0,90	0,69
T15	1	914	1	0,50	0,50
T16	5	1.097	3	1,00	1,00
T17	7	980	3	0,57	0,57
T18	6	1.142	3	0,77	0,77
T19	7	979	3	0,57	0,57
T20	6	1.143	3	0,91	0,97
T21	7	979	3	0,57	0,57
T22	1	914	1	0,50	0,50
T23	12	951	6	0,82	0,53
T24	1	1.142	1	0,80	0,80
T25	7	978	3	0,57	0,57
T26	21	977	11	0,94	0,64
Total	175	----	88	----	----

Solución transitoria. Se verifica el desempeño numérico de los métodos I y II considerando una discretización distinta a la aplicada para MC, aunque sin alterar los valores originales de α . Por ejemplo, según los **MÉTODOS I y II** con $\Delta t = 0,04$ (s) para ambos esquemas, se tienen los valores de N y Courant según lo mostrado en la **Tabla 4**. Las **Figuras 14a y 14b** muestran un comparativo de la presión en función del tiempo en N19 según el MC y los métodos I y II. La **Tabla 5** muestra un comparativo de las presiones extremas calculadas por el MC y los métodos I y II. La **Tabla 6** muestra el tiempo de ejecución gastado por cada método.

Tabla 5 Comparación de presiones extremas entre MC y los métodos I y II.

Presión extrema	Método			Error (m)	
	MC	I	II	I	II
Máxima (m)	+159,9	+159,6	+159,9	-0,3	0,0
Mínima (m)	-6,3	-5,7	-5,0	+0,6	+1,3

Tabla 6 Tiempos de ejecución del MC y de los métodos I y II.

Método	Tiempo de ejecución (s)
MC	2.053
I	2.084
II	881

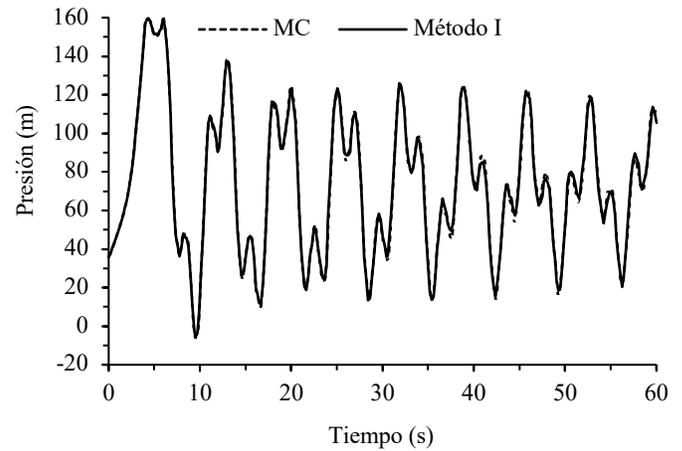


Figura 14a Curva de presión en función del tiempo en N19 cuando la red es resuelta usando el MC y el método I.

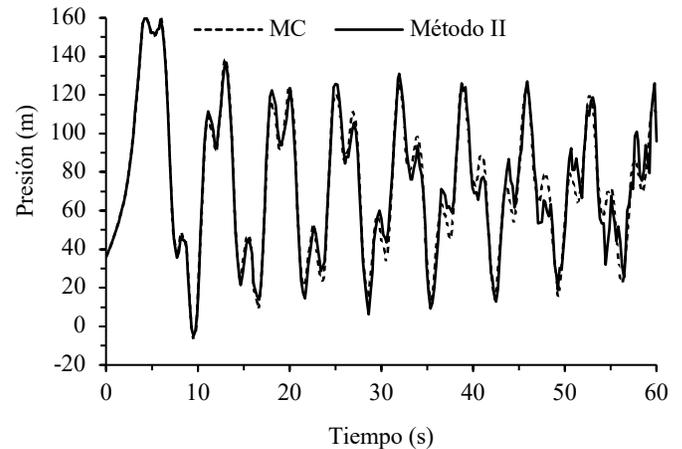


Figura 14b Curva de presión en función del tiempo en N19 cuando la red es resuelta usando el MC y el método II.

A partir de las **Figuras 14a y 14b**, y **Tablas 5 y 6**, se verifica que los métodos I y II registran un buen desempeño numérico, con errores en las presiones extremas máximas y mínimas que oscilan entre 0 y +1,3 (m). Además, según la **Tabla 6**, queda de manifiesto que el método II es el más rápido de todos, mostrando un buen nivel de precisión respecto de las expresiones extremas al compararlas con las entregadas por el MC (exacto). Por otro lado, el MC y el método I muestran un tiempo de ejecución muy similar, lo cual significa que la red propuesta puede ser resuelta indistintamente por cualquiera de ambos métodos, siendo la ventaja del método I que utiliza casi un 50% menos memoria computacional (N) en comparación al MC (**Tabla 4**). Además, el desempeño del método I, comparable al mostrado por MC, se justifica toda vez que fue aplicado reemplazando los tramos relativamente cortos (T5, T7, T15, T22 y T24) por elementos de

reemplazo de tuberías (Twyman, 2018), lo que permite acceder a mayores Δt con menor cantidad de N total. Al igual que en el ejemplo anterior, los métodos fueron corridos en un PC estándar de 64 bits con una velocidad de procesamiento de 1,40 (GHz).

4. Discusión

La mayoría de los programas de golpe de ariete basados en el MC y que trabajan con una malla espacio-tiempo con intervalo de tiempo pre-especificado imponen la condición de Courant en todos los tramos del sistema, esto para garantizar la estabilidad y exactitud de la solución en términos numéricos y evitar la utilización de interpolaciones numéricas que podrían degradar la solución. En la práctica esto significa que cada tramo debe cumplir con la relación $a \cdot \Delta t = \Delta x = L_p/N$. En general, las redes se componen de tuberías con distinto L_p y/o a , por lo que una vez definido el Δt común para todo el sistema, la fórmula usual para cumplir con Courant consiste en ajustar el valor de a hasta en $\pm 15\%$ en cada tramo que lo necesite. En este caso, se estableció un porcentaje máximo de variación razonable para a , que en los ejemplos analizados fueron $\pm 0,5\%$ (ejemplo 1) y $\pm 15,0\%$ (ejemplo 2). Para el ejemplo 1, esto significó adoptar un $\Delta t = 0,05$ (s), y un N total igual a 211. Para el ejemplo 2, $\Delta t = 0,02186653$ (s) y N total = 175. Esto permitió establecer condiciones necesarias para hacer una comparación entre el MC y los métodos I (implícito) y II (explícito), tomando en cuenta que estos dos últimos esquemas no necesitan modificar ningún dato inicial para mantener sus propiedades de estabilidad y precisión numérica. Los métodos I y II trabajan con un algoritmo de discretización flexible que se adapta a las condiciones físicas de cada sistema, por lo que no requieren adoptar una discretización igual a la necesitada por el MC como paso previo para resolver un problema. Esto constituye una ventaja evidente toda vez que les permite trabajar con Δt mayores, N menores y con $C_n \neq 1,0$ sin que sus propiedades numéricas sean afectadas significativamente. Para efectos prácticos, en ambos ejemplos analizados se supuso que el resultado entregado por el MC con $C_r = 1,0$ correspondía al valor exacto, esto para disponer de valores de referencia sobre los cuales calcular un error relativo. La aplicación de las ecuaciones (21), (22) y (23) diseñadas para el tratamiento simple de las condiciones de borde insertas en redes complejas permite desacoplar la red en sus diferentes tuberías, permitiendo la solución de los nudos internos mediante distintos esquemas numéricos, como el MDFI o el MCERT, los cuales registran un mejor desempeño numérico en redes donde C_r es distinto de 1,0. En el caso del MDFI se consigue además trabajar con sistemas de ecuaciones (uno por tramo) de tamaño proporcional a la cantidad de sub-tramos de cada tubería. Esto hace que el tamaño máximo del sistema de ecuaciones sea igual a 14X14 y 24X24 para los ejemplos 1 y 2, tamaños impuestos por T3 (ejemplo 1) y por T26 (ejemplo 2), respectivamente. Esto constituye una alternativa

más eficiente respecto de otra metodología similar propuesta por Chaudhry (1982), la cual trabaja construyendo y resolviendo un gran sistema de ecuaciones representativa de toda la red, cuyo tamaño mínimo sería de 38X38 en el ejemplo 1 y de al menos 71X71 en el ejemplo 2, con todas las implicancias en términos de uso de recursos computacionales. En el ejemplo 1 el método I registra dos picos de presión espurios en $t = 7,3$ (s) y $t = 13,4$ (s) iguales a 181,8 (m) y 58,7 (m), respectivamente, los cuales pueden ser atenuados modificando levemente los valores de los factores de ponderación del MDFI.

5. Conclusiones

Se concluye que los métodos I (implícito) y II (explícito) permiten conocer el comportamiento transitorio de una red en forma estable y precisa sin necesidad de cumplir rigurosamente con el criterio de Courant en todo el sistema, lo cual a su vez evita incurrir en un gasto significativo de recursos computacionales, especialmente cuando el sistema se compone de tuberías con distintas características (longitudes, velocidades de onda, etcétera). La modelación de los tramos cortos mediante elementos de reemplazo de tuberías permite readecuar la discretización de la red de forma de conseguir un menor efecto de ralentización del programa computacional debido a la magnitud de Δt , ya que de lo contrario la modelación transitoria dependería siempre de la longitud que tengan los tramos excesivamente cortos, afectando con ello la memoria y tiempo de ejecución.

6. Bibliografía

- [1] Arfaie, M.; Anderson, A, 1991. Implicit Finite-Differences for Unsteady Pipe Flow, *Mathematical Engineering for Industry*, 3(2), 133-151.
- [2] Boulos, P.F.; Karney, B.W.; Wood D.J.; Lingireddy S., 2005. Hydraulic Transient Guidelines for Protecting Water Distribution Systems. *Journal of AWWA*, 97(5), 111-124.
- [3] Chaudhry, M.H., 1979. *Applied Hydraulic Transients*, p. 266, New York, Van Nostrand Reinhold, *p. 395.
- [4] Chaudhry, M.H., 1982. Numerical Solution of Transient-Flow Equations. *Proc. Speciality Conf. Hydraulics Division, ASCE, Jackson, MS*, 633-656.
- [5] Chaudhry, M.H.; Hussaini, M.Y., 1985. Second-Order Accurate Explicit Finite-Difference Schemes for Waterhammer Analysis. *Journal of Fluids Engineering*, 107, 523-529, DOI:10.1115/1.3242524.
- [6] Chen, H.; Liu, H.; Chen, J.; Wu, L., 2013. Chebyshev Super Spectral Viscosity Method for Water Hammer Analysis, *Propulsion and Power Research*, 2(3), 201-207.
- [7] Ghidaoui, M.S.; Karney, B.W., 1994. Equivalent Differential Equations in Fixed-Grid Characteristics Method. *Journal of*



- Hydraulic Engineering, 120(10), 1159-1175, <http://hdl.handle.net/1783.1/26993>.
- [8] Goldberg, D.E.; Wylie, E.B., 1983. Characteristics Method using Time-Line Interpolations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(5), 670-683.
- [9] Izquierdo, J.; Pérez, R.; Fuertes, V.S.; Iglesias, P.L.; López, P.A., 2004a. Matemáticas para la Industria del Agua, *Ingeniería del Agua*, 11(2), 171-189.
- [10] Izquierdo, J.; Pérez, R.; Iglesias, P.L., 2004b. Mathematical Models and Methods in the Water Industry. *Mathematical and Computer Modelling*, 39, 1353-1374.
- [11] Karney, B.W., 1984. Analysis of Fluids Transients in Large Distribution Networks (Ph.D. Thesis). Vancouver: The University of British Columbia.
- [12] Karney, B.W.; McInnis, D., 1992. Efficient Calculation of Transient Flow in Simple Pipe Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(7), 1014-1030.
- [13] Karney, B.W.; Ghidaoui, M.S., 1997. Flexible Discretization Algorithm for Fixed-Grid MOC in Pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(11), 1004-1011, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:11(1004).
- [14] Nault, J.D.; Karney, B.W.; Jung, B.-S., 2018. Generalized flexible method for simulating transient pipe network hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(7), 04018031.
- [15] Nerella, R.; Rathnam, E.V., 2015. Fluid Transients and Wave Propagation in Pressurized Conduits due to Valve Closure. *International Conference on Computational Heat and Mass Transfer-2015*, *Procedia Engineering* 127, 1158-1164.
- [16] Salgado, R.O. (1992, 8-12 Septiembre). Revisión de los Métodos Numéricos para el Análisis del Ecurrimiento Impermanente en Redes de Tuberías a Presión. XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena, IAHR.
- [17] Salgado, R.O.; Twyman, J.; Twyman, C.; Zenteno J.C. (1993a, 5-7 Noviembre). Golpe de Ariete en Redes de Agua Potable. Enfoque Numérico de Análisis. X Congreso Chileno de Ing. Sanitaria y Ambiental, Valdivia, AIDIS.
- [18] Salgado, R.; Zenteno, J.; Twyman, C.; Twyman, J. (1993b, 7-9 September). A Hybrid Characteristics-Finite Difference Method for Unsteady flow in Pipe Networks, *International Conference on Integrated Computer Applications for Water Supply and Distribution*, Leicester.
- [19] Samani, H.M.V.; Khayatzaheh, A., 2002. Transient Flow in Pipe Networks, *Journal of Hydraulic Research*, 40(5), 637-644, doi: 10.1080/00221680209499908.
- [20] Twyman, J.; Twyman, C.; Salgado, R.O. (1997, 22-24 octubre). Optimización del Método de las Características para el Análisis del Golpe de Ariete en Redes de Tuberías, XIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica (53-62). Santiago de Chile, SOCHID.
- [21] Twyman, J., 2004. Decoupled Hybrid Methods for Unsteady Flow in Pipe Networks, p. 185. Valparaíso: Editorial La Cáfila, p* 102-110.
- [22] Twyman J. (2016a, 26-30 Septiembre). Golpe de Ariete en una Red de Distribución de Agua. *Anales del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR* (pp. 10), Lima, Spain Water and IWHR China.
- [23] Twyman, J., 2016b. Wave Speed Calculation for Water Hammer Analysis, *Obras y Proyectos, UCSC*, 20, 86-92, doi: 10.4067/S0718-28132016000200007.
- [24] Twyman, J., 2017a. Water Hammer Analysis in a Water Distribution System. *Ingeniería del Agua*, 21(2), 87-102, <https://doi.org/10.4995/la.2017.6389>
- [25] Twyman, J., 2017b. Métodos para el Análisis del Flujo Transiente en Redes de Tuberías, p. 137, *Editorial Académica Española*, *p. 43, 71, 74, 89-94.
- [26] Twyman, J. 2018. Elementos de Reemplazo de Tuberías para el Análisis del Flujo Transitorio en Redes de Tuberías. *Journal of Construction and Civil Engineering RIOCI*, 8(2), 17-24. <http://www.rioc.cl/index.php/RIOC/article/view/02>
- [27] Watt, C.S.; Boldy, A.P.; Hobbs, J.M., 1980. Combination of Finite Difference and Finite Element Techniques in Hydraulic Transient Problems, Paper B2, *Third International Conference on Pressure Surges*, Canterbury, BHRA.
- [28] Wood, D.J., 2005. Water Hammer Analysis-Essential and Easy (And Efficient), *Journal of Environmental Engineering*, 131(8), 1123-1131.
- [29] Wood, D.J., Lingireddy, S., Boulos, P.F., Karney, B.W., McPherson, D.L. 2005. Numerical Methods for Modeling Transient Flow in Distribution Systems, *Journal of AWWA*, 97(7), 104-115.
- [30] Wylie, E.B.; Streeter, V.L., 1978. *Fluid Transients*, p. 206, McGraw-Hill International Book Company, *p. 46.

Modelo de Calidad Para la Infraestructura Urbana de un Proyecto Inmobiliario Basado en el modelo 3CV+2. Quality model for urban infrastructure in a real estate project based on the 3CV + 2 model.

M. Davis¹, S. García²

¹Tecnológico de Monterrey, Mexico.

migueldavis@itesm.mx, teléfono: 00528183582000 ext. 5411

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido
09-01-2019
Aceptado
08-04-2019
Publicado
29-04-2019

Palabras Clave:
Modelo de calidad
Infraestructura urbana
Gráficos de control
Ciclo de mejora

Article history:

Received
09-01-2019
Accepted
08-04-2019
Available
29-04-2019

Keywords:
Quality model
Urban infrastructure
Graphic controls
Improvement cycle.

Resumen

El sector de vivienda en México es afectado recurrentemente por desastres naturales como huracanes, inundaciones y terremotos, destruyendo la infraestructura de vivienda de baja calidad y dejando como consecuencia a miles de personas damnificadas. El 2019 es un año retador para el Sector de la Vivienda en México, debido a la desaceleración de la economía nacional que se profundizará en este año, por lo tanto, debe ser percibido como un año de oportunidades, donde el proceso de adaptación al nuevo entorno ha iniciado desde hace meses. La siguiente investigación, intenta ayudar en la satisfacción de esta necesidad, proponiendo un Modelo de Calidad que apoye a los desarrolladores, en su día a día de la construcción de infraestructura urbana.

Actualmente en México no existe un modelo que evalúe la calidad de la infraestructura en desarrollos inmobiliarios. Por lo que se desarrolló un modelo de calidad que ayude a medir y controlar las variaciones frecuentemente obtenidas en los procesos constructivos. Este modelo involucra insumos, procesos y producto final de los procesos constructivos más importantes de la infraestructura urbana. Además permitirá el conocimiento de los elementos que se manejan dentro del proyecto de este tipo, así como los criterios considerados actualmente, a partir de normas o especificaciones. La metodología del modelo consiste en la determinación de los procedimientos constructivos, determinación de las variables contenidas en estos procedimientos constructivos, determinación de normas y tolerancias, determinación de tipo de gráfico de control, obtención de datos, determinación de número y tamaño de muestra, uso de gráfico de control, obtención de resultados, interpretación y ciclo de mejora.

Abstract

The housing sector in Mexico is frequently affected by natural disasters such as hurricanes, floods and earthquakes; events that destroy the low quality of housing infrastructure, leaving as a consequence thousands of victims. The year 2019 is a challenging one for the housing sector in Mexico, due to the slowness of the national economy going even deeper into this year; however this fact should be perceived as a year of opportunities, where the process of adjustment to the new environment has started since months ago. The following research, tries to satisfy this need, proposing a quality model that supports developers, on their daily activities regarding the construction of urban infrastructure.

Currently in Mexico does not exist a model that evaluates the quality of the infrastructure on real state projects. For that reason, a quality model was developed to measure and control the variations frequently obtained in the construction procedures. This model involves supplies, process and final product of the most important construction procedures involved in the urban infrastructure. The proposed model will let



to know the elements involved in this kind of project, as well as the criteria considered at the moment based on norms and specifications. The methodology consists on the determination of the construction procedures, the determination of the variables involved in these constructive procedures, the determination of norms and tolerances, the determination of the type of graphic control, the data gathering, the determination of the number and size of the sample, the use of the graphic control, the results gathering, interpretation and improvement cycle.

1. Introducción

El sector de vivienda en México es afectado recurrentemente por desastres naturales como huracanes, inundaciones y terremotos, destruyendo la infraestructura de vivienda con baja calidad constructiva y dejando como consecuencia a cientos de miles de personas damnificadas.

El año 2019 será un año de retos para el Sector de Vivienda de México, debido a la desaceleración de la economía mexicana, que se profundizará y generalizará. Si bien el 2018, se califica con un buen período para la vivienda, ya que se mantuvo el ritmo de ventas muy cercano a los máximos históricos, durante el año, fueron cada vez más claros los efectos de la situación económica mundial. El 2019, por lo tanto, debe ser percibido como un año de oportunidades, donde el proceso de adaptación al nuevo entorno ha iniciado desde hace meses atrás. El ritmo de inicio de construcción de casas se ha moderado significativamente y los inventarios se han reducido, particularmente para los segmentos de bajo y medio ingreso (Rivera, 2005). En el corto plazo, habrá mayor competencia por los compradores, la baja generación de empleo y su eventual reducción impactarán la demanda de vivienda. Por lo que los desarrolladores deberán planificar de una manera minuciosa el proceder de sus futuras inversiones, enfrentando un mercado exigente, donde la satisfacción del cliente presenta un reto ante el control de costos de construcción (Secretaría General de Gobierno del Estado de Nuevo León, 1999).

La siguiente investigación, intenta ayudar en la satisfacción de esta necesidad, proponiendo un Modelo de Calidad que apoye a los desarrolladores, en su día a día de la construcción de infraestructura urbana. No hay duda que en un panorama como el actual, ante los retos que nos trae la crisis económica mundial, una herramienta que permita controlar la calidad en las actividades de construcción surge como una respuesta práctica y sencilla que facilitará el correcto desarrollo de los proyectos inmobiliarios (Low & Teo, 2004).

Actualmente no existe en México un modelo que evalúe la calidad de la infraestructura en desarrollos inmobiliarios. La presente investigación desarrolla un modelo de calidad que ayude a medir y controlar las variaciones frecuentemente obtenidas en los resultados (Camisión et al, 2007)

Estas variaciones llevan a los desarrolladores a incurrir en retrabajos, incremento de costos estimado y el incumplimiento de los requisitos de calidad que pide el proyecto. Este modelo de calidad se basa en el aseguramiento de calidad, con esto se busca disminuir las variaciones de los procesos constructivos de la infraestructura urbana de los proyectos horizontales y de esta manera poder ofrecer al usuario un nivel alto de calidad, con base en parámetros constructivos técnicamente comprobados (Saarinen & Holbel, 1990). Este modelo de calidad involucra insumos, proceso y producto final de los procesos constructivos más importantes de la infraestructura urbana y permitirá el conocimiento de los elementos que se manejan dentro del proyecto, así como los criterios considerados actualmente, a partir de normas o especificaciones de proyectos.

2. Materiales y Métodos.

La metodología del trabajo para la implementación del modelo en un desarrollo inmobiliario constará de 3 etapas.

La primera etapa será la de capacitación, donde se espera que el personal involucrado desarrolle un sentido de pertenencia con el proyecto para que de esta manera ayude a su exitosa implementación.

La segunda etapa será la de implementación del modelo en donde es vital que exista un constante flujo de información por parte de la empresa, así como una constante retroalimentación por parte de los evaluadores, para que de esta manera exista una mejora continua durante el proceso de construcción.

Por último, en la tercera etapa se dará el dictamen de aprobación o rechazo del desarrollo, este proceso se explicará en detalle más adelante.

Para la elaboración del modelo se analizarán los diversos reglamentos de construcción de México, así como la información suministrada por parte de las desarrolladoras de vivienda, a fin de definir la documentación base que deberán manejar las empresas, como requisito inicial para la evaluación de la calidad.

2.1 Modelo propuesto

El Proceso de implementación del Modelo propuesto tiene como objetivo principal su fácil aplicación ya que será una herramienta a usar día a día en la construcción. Se basa en la determinación de procedimientos constructivos, que a su vez contienen variables que son los parámetros a evaluar. A su vez estas variables se pueden clasificar en críticas y no críticas dependiendo del grado de importancia de las mismas, y serán clasificadas en contables y medibles (Rico & Castillo, 1999). Posteriormente se determinará el número y tamaño de muestras. Determinado esto se procederá a la obtención de datos para de esta manera las variables sean analizadas por medio de gráficos de control que nos dirán si la variable evaluada se encuentra dentro de los límites permitidos.

Después se procede a la interpretación de los resultados y de esta manera detectar los puntos donde no se cumplen con los límites permitidos, posterior a esto se realizará un análisis y se determinaran las causas de las fallas. Se espera que hecha la retroalimentación se vuelvan a recolectar datos y estos se encuentren dentro de los límites permitidos.

En el desarrollo de este capítulo será mostrará más detalladamente cada una de las etapas del modelo. A continuación, se muestra un diagrama del proceso de implementación.

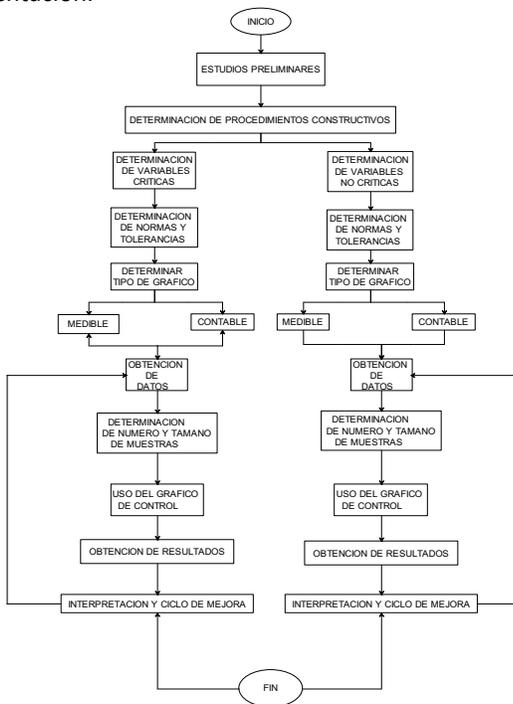


Figura 1 Diagrama del proceso de implementación del Modelo propuesto.

2.2 Conceptos y nomenclatura del modelo

Dentro del desarrollo y aplicación del modelo de calidad se usaron diferentes conceptos y su nomenclatura correspondiente. A continuación, se muestra un resumen estos:

Tabla 1 Conceptos y Nomenclatura del Modelo.

Concepto	Nomenclatura	Definición
Procedimiento constructivo	PC	Una serie de pasos a seguir que tienen como objetivo final la elaboración de un elemento constructivo
Variable	V	Son los elementos medibles o contables dentro de un procedimiento constructivo
Variable Medible	VM	Se denominan Variables medibles cuando las medidas pueden adoptar un intervalo continuo de valores; por ejemplo, la longitud, el peso, la concentración, etc.
Variable Contable	VC	Se denominan Variables contables cuando las medidas adoptadas no son continuas; ejemplo, tres tornillos defectuosos cada cien, seis personas cada 300, etc.
Variable Crítica	C	Es aquella variable contenida en un procedimiento que cuando no se cumplen sus normas y tolerancias pone en riesgo la integridad de las personas, materiales o equipos. También puede discontinuar la marcha de las operaciones, retrasar las entregas, afectar la calidad del producto final y afectar negativamente el costo.
Variables No Crítica	NC	Es aquella variable contenida en un procedimiento constructivo que cuando no se cumplen sus normas y tolerancias no pone en riesgo la integridad de las personas, materiales o equipos. No afecta la marcha de las operaciones, no retrasa las entregas, no afecta la calidad del producto final y no afecta negativamente el costo.
Gráfico de Control Medible	M	Herramienta de control estadístico para variables medible
Gráfico de Control Contable	C	Herramienta de control estadístico para variables contable
Tipo de muestreo	I, II, III o IV	Tamaño y número de muestra dependiendo de la variable (V)

2.3 Procedimientos constructivos

A continuación, se muestran los diferentes procedimientos constructivos que serán analizados para establecer las variables que serán evaluadas a fin de determinar la calidad en el producto.

La información presentada a continuación es el resultado de la interacción con desarrolladores inmobiliarios. Así como la revisión de bibliografía, normas y reglamentos de construcción de la República Mexicana.

Tabla 2 Listado de Procedimientos constructivos.

Nomenclatura	Procedimiento
PC-01	Trazo y Nivelación
PC-02	Desmonte y despalme
PC-03	Terracerías
PC-04	Pavimentos de concreto hidráulico
PC-05	pavimentos de asfalto
PC-06	Banquetas y guarniciones
PC-07	Instalaciones eléctricas (domicilio)
PC-08	instalaciones eléctricas en áreas comunes (luminarias)
PC-09	Previsión para telecomunicaciones
PC-10	Instalaciones Hidráulicas (agua potable)
PC-11	Drenajes sanitarios y Pluviales
PC-12	Instalación de hidrantes
PC-13	Jardinería y áreas comunes

2.4 Variables del modelo

Cada procedimiento constructivo que se clasificó anteriormente contiene diversas variables que son las que se evaluarán, la determinación de esta variable se logró mediante el análisis de las normas y reglamentos de construcción, así como la retroalimentación continua con desarrolladores de vivienda

Esta clasificación de variables se puede observar en la **Tabla 3**.

2.5 Determinación de variables críticas o no críticas

La determinación de la clasificación de las variables críticas o no críticas se realizará en base a las siguientes definiciones.

Variable crítica. Es aquella contenida en un procedimiento que cuando no se cumplen sus normas y tolerancias pone en riesgo la integridad de las personas, materiales o equipos. También puede discontinuar la marcha de las operaciones, retrasar las entregas, afectar la calidad del producto final y afectar negativamente el costo.

Variable no crítica. Es aquella contenida en un procedimiento constructivo que cuando no se cumplen sus normas y tolerancias no pone en riesgo la integridad de las personas, materiales o equipos. No afecta la marcha de las operaciones, no retrasa las entregas, no afecta la calidad del producto final y no afecta negativamente el costo.

La información presentada a continuación es el resultado del análisis de las normas y tolerancias de variables presentadas anteriormente para de esta manera poder realizar su clasificación. Así como también de la interacción con desarrolladores inmobiliarios que aportaron sus normas y criterios para obtener una herramienta congruente con la realidad.

Tabla 3 Clasificación de Variables Críticas y Variables No Críticas según su procedimiento.

Procedimiento	Variable	Clasificación
PC 1	Cierre Topográfico V1	NC
PC 2	Espesor de Despалme V2	C
PC 3	Espesor de capa V3	C
	Nivel final de capa V4	C
	Compactación de capa V5	C
	Ancho de corona, o banqueta V8	NC
PC 4	Índice Plástico	C
	Valor relativo de soporte (VRS)	C
	Espesor de capa V3	C
	Nivel final de capa V4	C
	Resistencia de concreto V6	C
	Revenimiento de concreto V7	C
PC 5	Ancho de corona, o banqueta V8	NC
	Índice Plástico V9	C
	Valor relativo de soporte (VRS)V10	C
	Espesor de capa V3	C
	Riego de impregnación V11	C
	Humedad de compactación V12	C
	Nivel final de capa V4	C
	Compactación de capa V5	C
	Separación de juntas de contracción en banquetas y pavimentos de concreto V13	C
	Profundidad de juntas de contracción en banquetas y pavimentos de concreto. V14	C
	Grado de compactación del asfalto V15	C
	Contenido de asfalto V16	C
	Permeabilidad V17	C
Ancho de corona, o banqueta V8	NC	

PC 6	Resistencia de concreto V6	C
	Ancho de corona, o banqueta V8	NC
PC 8	Calibre del cable conductor de corriente V18	C
PC 9	Separación de registros para Cable e Internet V19	NC
PC 10	Hermeticidad de PVC para agua potable V20	C
PC 11	Hermeticidad en tubos de drenaje V21	C
PC 12	Separación de pozos de visita en red sanitaria V22	NC
PC 13	Espesor de tierra vegetal en áreas comunes V24	NC

2.6 Determinación de normas y tolerancias

Las normas y tolerancias deberán estar contenidas dentro de procedimientos constructivos que contienen los parámetros y lineamientos que se seguirán para determinar la calidad de los resultados obtenidos.

La información presentada en la **Tabla 4** es el resultado de la búsqueda de tolerancias y normas en los reglamentos de

construcción, así como también de la interacción con desarrolladores inmobiliarios que aportaron sus normas y criterios para obtener una herramienta congruente con la realidad.

2.7 Determinación del tipo de gráfico de control

La idea tradicional de inspeccionar el producto final en la construcción y eliminar las unidades que no cumplen con las especificaciones una vez terminado el proceso, se reemplaza por una estrategia más económica de prevención antes y durante del proceso de construcción con el fin de lograr que precisamente estos productos lleguen al consumidor sin defectos (Lopez, 1999).

En el presente modelo se usarán 2 tipos de gráficos de control.

- Gráfico de control de variables medibles
- Gráfico de control de variables contables

A continuación, se muestra un resumen del tipo de gráfico y tolerancia según su variable.

Tabla 4 Clasificación del tipo de gráfico. (Fuentes: Normas N-CTR-CAR-1-04-006/00, 2000, N-CTR-CAR-1-04-002/03, 2003, NOM-001-SEDE-2005 y N-CMT-2-02-005/4)

Procedimiento	Variable	Tipo de gráfico	Tolerancia y norma
PC 1	Cierre Topográfico V1	Contable	Cierre Poligonal = 1/3000m, Cierre Angular = 1*n Normativa Infonavit
PC 2	Espesor de Despalme V2	Medible	Espesor indicado en proyecto N-CTR-CAR-1-01-002/00
PC 3	Espesor de capa V3	Medible	Subbase = ± 1.5 cm, Base = ± 1.0 cm, Su. de rodadura = ± 1.0 cm N-CTR-CAR-1-04-002/03
	Nivel final de capa V4	Medible	Subbase = ± 1.5 cm, Base = ± 1.0 cm Su. de rodadura = ± 1.0 cm N-CTR-CAR-1-04-002/03
	Compactación de capa V5	Medible	Grado de Comp. = 100% Tolerancia indicada en proyecto N-CTR-CAR-1-04-002/03
	Ancho de corona, o banqueta V8	Medible	La distancia comprendida entre el eje central a la orilla no deberá variar en más de 5 cm. N-CTR-CAR-1-04-002/03
PC 4	Índice Plástico	Medible	10% en base y subbase
	Valor relativo de soporte (VRS)	Medible	10% en base y subbase
	Espesor de capa V3	Medible	Subbase = ± 1.5 cm Base = ± 1.0 cm Su. de rodadura = ± 1.0 cm N-CTR-CAR-1-04-002/03



	Nivel final de capaV4	Medible	Subbase = ± 1.5 cm Base = ± 1.0 cm Su. de rodadura = ± 1.0 cm N-CTR-CAR-1-04-002/03
	Resistencia de concreto V6	Medible	La tolerancia de la resistencia del concreto a los 28 días del colado será dictada por el proyecto
	Revenimiento de concreto V7	Medible	Revenimientos menores de 5 cm = ± 1.5 cm de tolerancia. (Recomendado para carreteras) N-CMT-2-02-005/04
	Ancho de corona, o banquetta V8	Medible	La distancia comprendida entre el eje central a la orilla no deberá variar en más de 5 cm. N-CTR-CAR-1-04-002/03
PC 5	Índice Plástico V9	Medible	10% en base y subbase
	Valor relativo de soporte (VRS)V10	Medible	10% en base y subbase
	Espesor de capaV3	Medible	Subbase = ± 1.5 cm, Base = ± 1.0 cm Su. de rodadura = ± 1.0 cm N-CTR-CAR-1-04-002/03
	Riego de impregnación V11	Medible	.5 le/m2 en la base
	Humedad de compactación V12	Medible	2% en la base
	Nivel final de capaV4	Medible	"Subbase = ± 1.5 cm, Base = ± 1.0 cm Su. de rodadura = ± 1.0 cm N-CTR-CAR-1-04-002/03"
	Compactación de capa V5	Medible	"Grado de Comp. = 100% Tolerancia indicada en proyecto N-CTR-CAR-1-04-002/03"
	Separación de juntas de contracción en banquetas y pavimentos de concreto V13	Medible	0.3
	Profundidad de juntas de contracción en banquetas y pavimentos de concreto. V14	Medible	0.3e donde he es el espesor de la losa
	Grado de compactación del asfalto V15	Medible	.5 CM
	Contenido de asfalto V16	Medible	5%
	Permeabilidad V17	Medible	5 le/m3
		Ancho de corona, o banquetta V8	Medible
PC 6	Resistencia de concreto V6	Medible	La tolerancia de la resistencia del concreto a los 28 días del colado será dictada por el proyecto
	Ancho de corona, o banquetta V8	Medible	La distancia comprendida entre el eje central a la orilla no deberá variar en más de 5 cm. N-CTR-CAR-1-04-002/03
PC 8	Calibre del cable conductor de corriente V18	contable	El calibre del conductor deberá ser exactamente igual al indicado por el proyecto.
PC 9	Separación de registros para Cable e Internet V19	Medible	La separación de registros no deberá diferir en más de 0.50m la especificación del proyecto.
PC 10	Hermeticidad de PVC para agua potable V20	contable	La hermeticidad en redes domiciliarias se verificará a una presión de 7.5 Kg/cm2 durante 3 minutos. La presión no deberá variar. NOM-002-CNA-1995

2.8 Obtención de datos del modelo propuesto

Para la obtención de datos del modelo propuesto se desarrolló una hoja de recolección de datos, en la cual se tiene que especificar la variable a evaluar, proyecto, tipo de muestreo, tipo de gráfico, supervisor y puntos geográficos a evaluar referenciados en el plano contractivo. A continuación de muestra la hoja de recolección de datos antes mencionada.

2.9 Determinación del número y tamaño de muestras

El muestreo debe tomar en consideración tres factores esenciales:

- Ser representativo, lo suficientemente grande para cubrir las necesidades del control.
- Debe ser económicamente viable, no deberá tornarse un muestreo más costoso de lo necesario
- Debe estar acorde con la homogeneidad de lo que se muestrea, los materiales o actividades con tendencia natural a la dispersión deberán muestrearse más que los homogéneos (Burati & Matthews, 1992).

Basado en la experiencia del Dr. Salvador García R., asesor de esta investigación se propone medir el 30% de los resultados, con la condición de que este 30% su $n \geq 30$. Esperando que el restante 70% se comporte de manera parecida.

El muestreo tipo I, corresponde a las variables V2, V3, V4, V5. El criterio de muestreo a utilizar será el 30% de la longitud total del desarrollo, en mínimo el 30% de la cantidad de calles, procurando medir al menos 5 calles.

El muestreo tipo II corresponde a las variables V6, V7, V8, V9, V11. Por la naturaleza de las variables, deberán ser muestreadas a lo largo de la vialidad.

El criterio utilizado para el muestreo es analizar el 30% del total de las calles del fraccionamiento. Siguiendo con las características utilizadas para el ejemplo anterior, si se tienen 20 calles en el fraccionamiento el número de muestras será 6.

Se procurará distribuir las medidas, de tal manera que se obtengan resultados de inicio, al cuarto, mitad, tres cuartos y fin

de calle. Sin tener restricción de separación mínima entre medida, como el caso del muestreo tipo I donde se solicita una separación mínima de 50 metros (García et al, 2006)

Para la medición de las variables V6 y V7, se sugerirá mínimo 5 muestras, procurando obtener resultados de inicio, cuarto, mitad, tres cuartos y fin de calle.

El muestreo tipo III este tipo de muestreo, corresponde a las variables V10, V12, V13, V14, V15, V18, V19, V20, V22. Se muestreará el 30% de las calles, igual al muestreo tipo II, solo que en este caso no se podrán graficar los resultados, por lo que el criterio de aceptación depende si se cumplen o no con los requisitos mínimos de calidad.

El muestreo tipo IV corresponde a las variables restantes: V1, V16 y V17, V23.

Estas variables tampoco se graficarán, pero a diferencia de las demás variables no existirá criterio de muestreo, sino que se verificará solamente que hayan cumplido con los requisitos de calidad.

3. Resultados

Parte medular de este modelo propuesto es que exista un ciclo de mejora en el desarrollo del proyecto de urbanización. Para poder lograr esto, se realiza un análisis de cada una de las variables por medio de sus gráficos de control, para de esta manera observar que se cumplan 2 puntos:

- Cumplimiento de sus normas y tolerancias marcadas en las normas y reglamentos de México.
- Que se encuentren dentro de los límites superior e inferior en sus gráficos de control.

Cuando los resultados obtenidos no se encuentran dentro de los límites superior e inferior se procede al análisis y corrección del problema, después de corregido el problema se procede a la nueva obtención de los datos, graficarlos e interpretación de resultados nuevamente.

Se busca que los resultados obtenidos se encuentren dentro de los límites. A continuación, ilustramos con un ejemplo lo mencionado anteriormente.

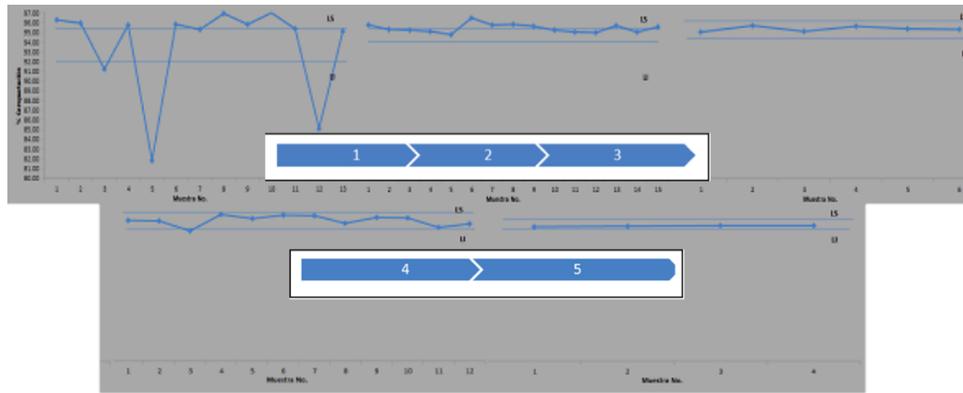


Figura 2 Ejemplo de gráfico de control de medias

En el gráfico se observan los límites estadísticos superior e inferior y se observa el comportamiento de los resultados del muestreo. Se observa que los promedios de las muestras se encuentran por encima del límite estadístico superior en las primeras mediciones, pero conforme se dio retroalimentación el proceso de fue estandarizando

A continuación, se muestran los resultados de todas las variables evaluadas.

Tabla 6 Clasificación del tipo de gráfico. GC = Gráfico de control y NT = Normas y Tolerancias.

Variable	Análisis 1 GC	Análisis 1 NT	Análisis 2 GC	Análisis 2 NT	Análisis 3 GC	Análisis 3 NT	Análisis 4 GC	Análisis 4 NT	Análisis 5 GC	Análisis 5 NT	Análisis Final
Cierre Topográfico V1	Paso	X									
Espesor de capa V3	Paso	X									
Compactación de capa V5	No paso	No paso	No paso	No paso	Paso	No paso	Paso	Paso	Paso	Paso	X
Ancho de corona, o banquetta V6	No paso	Paso	Paso	Paso	Paso	Paso	Paso	Paso	Paso	Paso	X
Espesor de capa V7	Paso	X									
Resistencia de concreto V9	No paso	Paso	No paso	Paso	Paso	Paso	No paso	Paso	Paso	Paso	X
Revenimiento de concreto V10	No paso	No paso	No paso	Paso	Paso	No paso	Paso	Paso	Paso	Paso	X
Espesor de capa V12	No paso	No paso	Paso	No paso	Paso	No paso	Paso	No paso	Paso	No paso	-
Grado de compactación del asfalto V15	No paso	Paso	No paso	Paso	Paso	No paso	Paso	No paso	Paso	Paso	X
Contenido de asfalto V16	Paso	No paso	-								
Permeabilidad V17	Paso	X									
Resistencia de concreto V18	Paso	No paso	Paso	No paso	Paso	Paso	Paso	No paso	Paso	Paso	X
Revenimiento de concreto V19	No paso	-									
Calibre del cable conductor de corriente V20	Paso	X									
Separación de registros para Cable e Internet 21	Paso	X									
Hermeticidad de PVC para agua potable V22	Paso	X									
Hermeticidad en tubos de drenaje V23	Paso	X									
Separación de pozos de visita en red sanitaria V24	Paso	X									

3.1 Implementación exitosa del modelo propuesto

Una vez completado el proceso de implementación del modelo, y en función de los resultados generados, se procederá a determinar si la implementación del modelo propuesto fue exitosa o no. Para poder determinar esto hay 2 criterios.

Implementación exitosa A. Cuando se encuentren dentro de las normas y tolerancias el 100% de las variables críticas y el 100% de las variables No críticas. Debido al formato de Mejora Continua de la Calidad que tiene el Modelo propuesto, el 100% de las variables es conseguible.

Implementación exitosa A condicionada. Cuando se encuentren dentro de las normas y tolerancias el 100% de las variables críticas y el 80% de las variables No críticas. Con la condición de la corrección en un lapso de 1 mes de las variables no aprobadas, para de esta manera contar con el 100% de las variables críticas y No críticas.

A continuación, se muestra una imagen que nos muestra el proceso de aprobación.

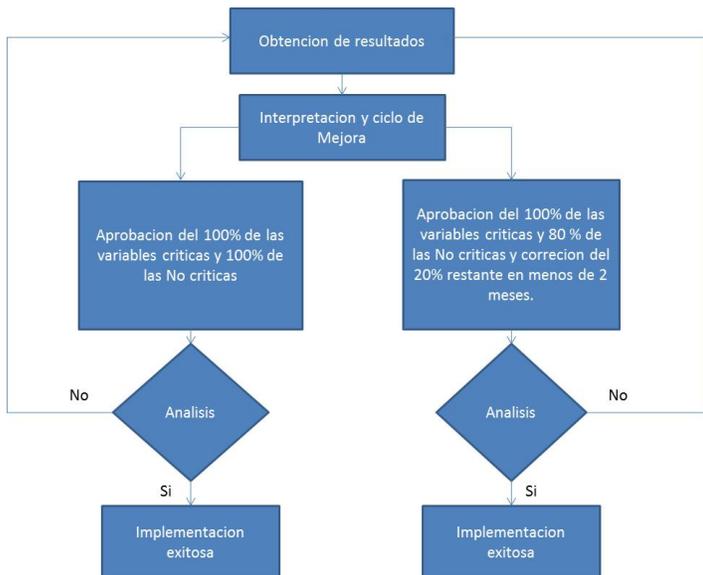


Figura 3 Diagrama del proceso de aprobación.

A continuación, se muestran las variables aprobadas y las no aprobadas.

Tabla 7 Variable aprobadas y No aprobadas.

Variable	Análisis Final	Crítica o No Crítica
Cierre Topográfico V1	Paso	NC
Espesor de capa V3	Paso	NC
Compactación de capa V5	Paso	C
Ancho de corona, o banqueta V6	Paso	NC
Espesor de capa V7	Paso	NC
Resistencia de concreto V9	Paso	C
Revestimiento de concreto V10	Paso	C
Espesor de capa V12	Na paso	NC
Grado de compactacion del asfalto V15	Paso	C
Contenido de asfalto V16	No paso	C
Permeabilidad V17	Paso	C
Resistencia de concreto V18	Paso	C
Revenimiento de concreto V19	No paso	C
Calibre del cable conductor de corriente V20	Paso	C
Separacion de registros para Cable e Internet 21	Paso	C
Hermeticidad de PVC para agua potable V22	Paso	C
Hermeticidad en tubos de drenaje V23	Paso	C
Separación de pozos de visita an red sanitaria V24	Paso	NC

4. Discusión

La variabilidad de los resultados obtenidos de un proceso, pueden suceder por causas asignables o no asignables, dependiendo de la naturaleza de estas. Esto se pudo observar claramente en las variables no aprobadas donde el principal problema fue la mala calidad de los insumos suministrados. Si son efecto de incumplimiento de normas, especificaciones, faltas a procedimientos definidos o alguna otra causa que dependa del personal que ejecuta el trabajo, se puede decir que son asignables. Si la naturaleza de la causa es externa al proceso en estudio, es una causa no asignable.

Es de común conocimiento que en la industria de la construcción, por su naturaleza artesanal en la gran mayoría de las actividades, muchas de las causas de las variabilidades encontradas en los resultados son asignables, es decir, la variabilidad de los resultados se pudo normalizar haciendo más eficiente la supervisión en la obra.

El modelo desarrollado en esta investigación, sienta las bases para la medición y control de las variabilidades en la infraestructura de desarrollos inmobiliarios.



- CONSTRUCTION. Chile. Julio.
- [4] Lopez, C., 1999. "Control estadístico de la calidad" Teoría, práctica y aplicaciones informáticas. 73-80.
- [5] Low, P.; Teo, J., 2004. "Implementing Total Quality Management in Construction Firms". J. Mgmt in Engrg. Volume 20 No. 1 ,2-3.
- [6] Rico, A.; Castillo, D., 1999 ."La Ingeniería de suelos en las vías terrestres" Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. 561, 582-584.
- [7] Rivera B., 2005. Manual de Implementación del Aseguramiento de Calidad en la Industria de la Construcción. Tesis Maestro en Administración de Construcciones. ITESM. Monterrey, N.L., México,
- [8] SAARINEN Jr., HOBEL. 1990. "Setting and Meeting Requirements for Quality". J. Mgmt in Engrg. Volume 6 No. 2,178-181.
- [9] Secretaría de Comunicación y Transporte. Norma N-CMT-2-02-005/4. 2004. Libro CMT. Características de los materiales. 4-5.
- [10] Secretaría de Comunicación y Transporte. Norma N-CTR-CAR-1-04-002/03, 2003. Libro CTR. Construcción. 7-8.
- [11] Secretaría de Comunicación y Transporte. Norma N-CTR-CAR-1-04-006/00, 2000. Libro CTR. Construcción. 13-14,18.
- [12] Secretaría de Energía. 2005. Norma NOM-001-SEDE-2005. Aprobada en la cuarta sesión ordinaria del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Instalaciones Eléctricas, celebrada el 8 De Noviembre De 2005.
- [13] Secretaría General de Gobierno del Estado de Nuevo León. 1999. Ley de Ordenamiento Territorial de los Asentamientos Humanos y de Desarrollo Urbano del Estado de Nuevo León. Publicada en el Periódico Oficial del Estado de fecha 3 de marzo; 68, 71-72, 75.",

Ecuaciones de Predicción del Movimiento Fuerte para un Sistema de Alerta Temprana de Terremotos. Ground Motion Prediction Equations for a Early Warning System Earthquake.

G. Sancy¹

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Diego Portales, Santiago, Chile
giannina.sancy@mail.udp.cl, teléfono: +56 9 94381618

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido
14-01-2019
Aceptado
09-04-2019
Publicado
29-04-2019

Palabras Clave:
Ecuaciones de
atenuación
Atenuación geofísica
Laguna sísmica
Efecto de sitio
Alerta Temprana de
Terremotos

Article history:

Received
14-01-2019
Accepted
09-04-2019
Available
29-04-2019

Keywords:
Ground Motion
Prediction Equations
Seismic attenuation
Seismic gap
Local sites effects
Early Earthquake
Warning

Resumen

Dado que Chile está constantemente expuesto a mega-terremotos, en esta investigación se desarrollaron Ecuaciones de Predicción del Movimiento Fuerte del Suelo (GMPEs) en conjunto con el Centro Sismológico Nacional (CSN). Estas curvas predictoras de amplitud sísmica se generaron para el gap sísmico que existe en el norte de Chile. Este segmento abarca desde Arica con latitud 18S hasta el norte de la península de Mejillones con latitud 23S.

Todo este estudio está impulsado por la motivación que significa la posibilidad de implementar en Chile el nuevo sistema de alerta temprana de terremotos japonés, que permita en tiempo real y de manera simplificada, estimar la intensidad sísmica basada en predicciones de magnitud para terremotos de subducción interplaca.

Se obtuvieron coeficientes confiables para un rango que oscila entre los 4,0Mw a los 8,1Mw ya que las predicciones se acercan bastante al dato real según el análisis de variabilidad, por lo que es posible establecer umbrales de magnitud y en base a ello, generar planes de acción y/o protocolos a la comunidad.

Abstract

Since Chile is constantly exposed to mega-earthquakes, this research developed Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) carried out with help from the Centro Sismológico Nacional (CSN). The predictive seismic amplitude curves were generated from the seismic gap that exist in Chile. This zone extends from Arica with latitude of 18S to the north of the península of Mejillones at a latitude of 23S.

All this motivated the implementation of the japanese Early Earthquake Warning System (EEWS) allowing in real time and in a simplified way based on predictions of magnitude, the estimation of seismic intensity for interplate earthquakes.

Reliable coefficients were obtained for a range ranging from 4,0Mw to 8,1Mw. Since these predictions are close enough to actual data, according to the analysis of variability it is possible to calculate thresholds of seismic intensity, and based on those calculations develop courses of action for earthquake-prone communities.



1. Introducción

El 1 de octubre del año 2007, la Agencia Meteorológica de Japón (J.M.A.) implementó un sistema de alerta temprana de terremotos (E.E.W.) el cual ha emitido 44 alarmas inapropiadas después de dos meses de ocurrido el terremoto del 11 de marzo del 2011 en Japón, incrementando a un total de 70 avisos falsos. El 70% de estas falsas alarmas corresponden a ruidos accidentales con amplitudes de ondas mucho mayores a las que siempre se registran en los sismógrafos y, por lo tanto, el sistema lo considera como un evento sísmico. Sin embargo, se propuso un nuevo algoritmo (Wu et al., 2015) en Diciembre del año 2016 que tiene la capacidad de manejar estos eventos múltiples y permite disminuir en un 90% ese 70% las falsas alarmas a través del método Integrated Particle Filter (IPF) (Wu et al., 2015).

Actualmente, el Centro Sismológico Nacional busca implementar en Chile el nuevo sistema de alerta temprana de terremotos de Japón, ya que al estar emplazado sobre el sistema de subducción de la placa de Nazca y la Sudamericana, se caracteriza por ser un país que está en constante movimientos telúricos generándose temblores a una tasa de convergencia de placa de 8 centímetros por año según Melnick et al. (2003) con terremotos de grandes magnitudes como como fue el sismo del 2010 Mw8,8 Cauquenes o el del 2014 Mw8,1 Iquique. Sin embargo, en el territorio continental chileno se ha detectado hasta el momento una zona que no ha presentado gran actividad sísmica en los últimos años según Comte & Pardo (1991) (sin considerar el 8,1Mw Iquique 2014) el cual corresponde al gap sísmico que abarca desde Arica con latitud 18S hasta el norte de la península de Mejillones con latitud 23S.

En este contexto, se hace necesario desarrollar Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) o en español, Ecuaciones De Predicción Del Movimiento Fuerte Del Suelo para esta zona que no ha presentado gran actividad sísmica en los últimos años de modo que funcionen como dato de entrada para implementar un sistema de alerta temprana de terremotos que permita en tiempo real y de manera simplificada, estimar la magnitud de eventos sísmicos.

2. Antecedentes teóricos

El sistema de alerta temprana de terremotos (EEW) de Japón ha provocado confusiones en la población debido a que ha emitido falsas alarmas. El 70% de éstas corresponden a eventos simultáneos. Sin embargo, se propuso un nuevo algoritmo que tiene la capacidad de manejar múltiples eventos (Wu et al., 2015) reduciendo un 90% el número de falsas alarmas.

Este algoritmo, basado en el método Integrated Particle Filter (IPF), utiliza un flujo de datos continuo de alrededor de 300 acelerómetros y 700 sismómetros distribuidos espacialmente por todo Japón y se compone de dos procesos importantes: la primera parte se enfoca a encontrar el número más probable de eventos simultáneos en una zona dado una base de datos de terremotos basados en la teoría de la selección de clase del modelo Bayesiano y la segunda a realizar, es la inversión sísmica para encontrar los valores de los parámetros de magnitud e hipocentro del terremoto dado el modelo generado en el primer proceso.

Por último, para obtener la magnitud final de cada sitio, ésta se calcula en base a la magnitud estimada y la localización del hipocentro usando los GMPEs descritos en esta investigación.

Este nuevo algoritmo obliga a que las ecuaciones de predicción del movimiento fuerte del suelo tengan los siguientes requisitos:

- Los GMPEs se deben formular en base a algún método de regresión que se ajuste lo más posible al conjunto de eventos sísmicos para encontrar los coeficientes utilizando los parámetros de distancia, profundidad, desplazamiento máximo horizontal del suelo y magnitud.
- A los registros de desplazamientos se les deberá aplicar un filtro paso-alto de 6 segundos equivalente a 0,16667 Hz, el cual elimina todas las frecuencias inferiores a la indicada asumiéndolas como ruido, y deja pasar sin atenuación las frecuencias superiores o la señal principal.

3. Desarrollo

3.1 Zona de estudio

Una brecha sísmica o seismic gap es un segmento de una zona de convergencia de placas, particularmente como es el caso de Chile por ejemplo, en donde históricamente se ha caracterizado por tener sismicidad con magnitudes importantes ($M_w > 8,0$) estimados en base a antecedentes históricos más datos medidos en la corteza por velocidades de placas, pero que en la actualidad no ha registrado actividad sísmica significativamente mayores y, por lo tanto, el peligro sísmico de estas zonas es mayor a causa de la cantidad de energía acumulada en el tiempo generando cierta probabilidad de que en un futuro vuelvan a ocurrir eventos mayores al mencionado.

En el Norte de Chile, el terremoto más actual es el de magnitud 8,2 Mw ocurrido el 1 de abril del 2014 a las 23:46 GMT a 94 Km al Noroeste de Iquique a una profundidad de 25 km, activando solo un segmento de esta zona. Este terremoto tuvo una réplica de magnitud 6,9 Mw en ese mismo día y luego 3 nuevas réplicas

adicionales en los días siguientes: dos de 6,9 Mw más la réplica principal de 7,6 Mw. Se observa que el área de ruptura de este evento es bastante pequeña si se compara el terremoto de magnitud 8,0 Mw en Antofagasta en 1995. En la **Figura 1** sobre la modelación de la falla finita realizada por la USGS, la zona de ruptura del terremoto de Iquique abarca aproximadamente 200 kilómetros de longitud. Esta pequeña ruptura se debe a que la mayor liberación de energía ocurre en un corto intervalo de 20 a 40 segundos aproximadamente, seguido de un peak menor entre los 60 a los 80 segundos como se muestra en la **Figura 2**.

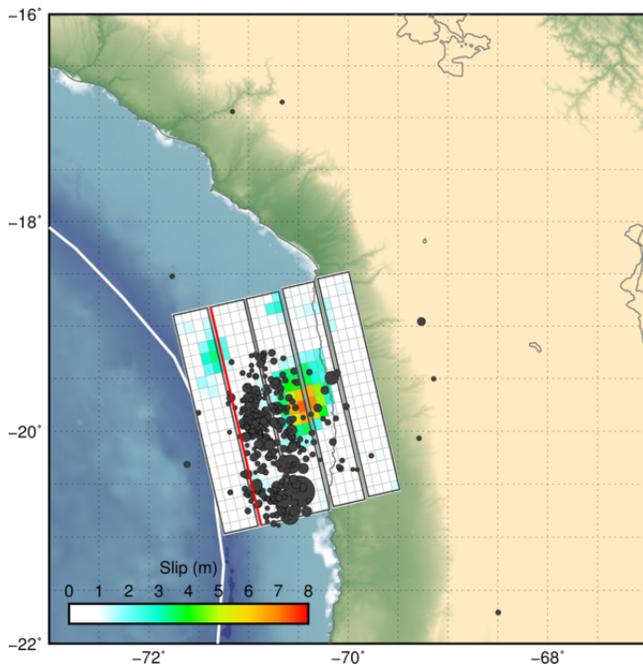


Figura 1 Modelación falla finita terremoto 8,2 Mw Iquique 2014 (Fuente: extraído de (United States Geological Survey (USGS), 2018)).

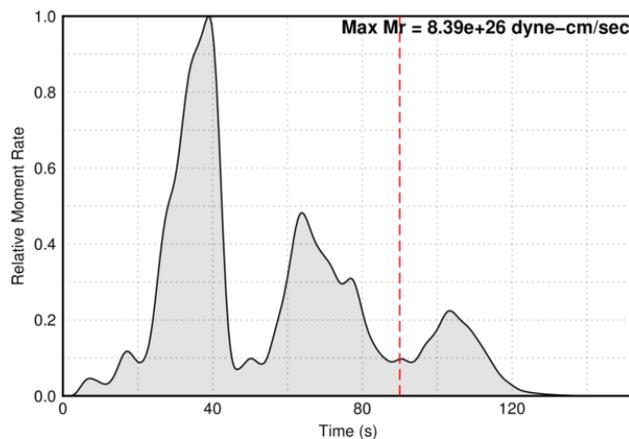


Figura 2 Relative Moment Ratio (Fuente: extraído de (United States Geological Survey (USGS), 2018)).

Respecto al marco sismo-tectónico y laguna sísmica previo a este terremoto en Iquique (CSN, 2014), el segmento que abarca desde la latitud 15°S al 24°S correspondiente a la zona sur de Perú y norte de Chile es considerada como un seismic gap según indica Comte & Pardo (1991). Esta zona se ha caracterizado por registrar grandes terremotos destructivos como lo fue el terremoto de 9,0Mw Arica, 13 de agosto de 1868.

En función de estos antecedentes y agregando la hipótesis de la barrera natural sísmica de la Península de Mejillones (Victor et al. 2011) que impide la propagación de la ruptura de los terremotos de subducción adyacentes, se establece el primer gap sísmico que correspondería desde Arica con latitud 18S hasta el norte de la península de Mejillones de latitud 23S (ver Figura 3), desde el terremoto de 1877 de 8,8 Mw al norte de Chile y el sur de Perú en 1868 correspondiente al sismo mencionado en el párrafo anterior, ya que el sismo de Iquique no liberó completamente el déficit de desplazamiento acumulado en esa zona.



Figura 3 Gap sísmico norte de Chile (Fuente: edición propia)

3.2 Análisis de la base de datos

Se realiza un análisis exploratorio del catálogo de terremotos del gap sísmico del norte de Chile con el objetivo de conocer la cantidad total de registros, la calidad de los resultados por evento, posibles tendencias, errores en estimaciones de magnitud y localización de sismos.

En esta investigación, la compilación de datos comienza desde el año 2014 hasta el 1 de enero del 2018 usando registros adquiridos de las redes internacionales colaboradoras Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) y GeoForschungsZentrum (GFZ) de Potsdam, Alemania, administradas por el Centro Sismológico Nacional (CSN).

La adquisición de los registros de aceleraciones se realizó en base a la hora universal (Universal Time Coordinate, UTC) para un rango de magnitudes de momento que oscila entre 4,0 a 9,0.

En la Figura 4 se muestra la cobertura de las estaciones sismológicas distribuidas en el territorio continental chileno (ver detalle de estaciones en A.1 Red de acelerógrafos). Se observa que la mayor densidad de estaciones se encuentra en el norte de Chile, específicamente entre las latitudes 18S hasta 23S aproximadamente esperándose que la calidad de los resultados sea confiable.



Figura 4 Red de acelerógrafos en Chile (Fuente: edición propia).

La base de datos de la brecha sísmica del norte de Chile para eventos del tipo interplaca con latitud de 18S a 23S y longitud de 72W a 69W cuenta con 580 eventos sísmicos de aceleraciones sin procesar en total a partir del 16 de marzo del 2014 a las 00:00:00 horas hasta el 1 de enero del 2018 a las 00:00:00 horas. Este segmento dispone de 25 estaciones sismológicas distribuidas espacialmente en las latitudes descritas anteriormente como se muestra en la Figura 5, es decir, en 555 kilómetros aproximadamente con una tendencia hacia la costa chilena (desde 69W a 70,15W aproximadamente). Sin embargo, se utilizaron 21 acelerógrafos (PB16, AP01, PB12, AP02, MNMCX, PSGCX, GO01, PB11, PB08, HMBCX, PATCX, PB01, PB02, PB07, PB09, PB03, PB04, PB05, PB06, AF01, PB15) debido a que la estación LVC solo registra trazas de aceleraciones en dos (norte N, oeste W) de las tres direcciones (norte N, oeste W, vertical Z) que se necesitan para realizar el estudio y TA01 con TA02 fueron eliminadas por considerarse instrumentos mal calibrados.



Figura 5 Red acelerógrafos en la zona del gap sísmico (Fuente: edición propia).

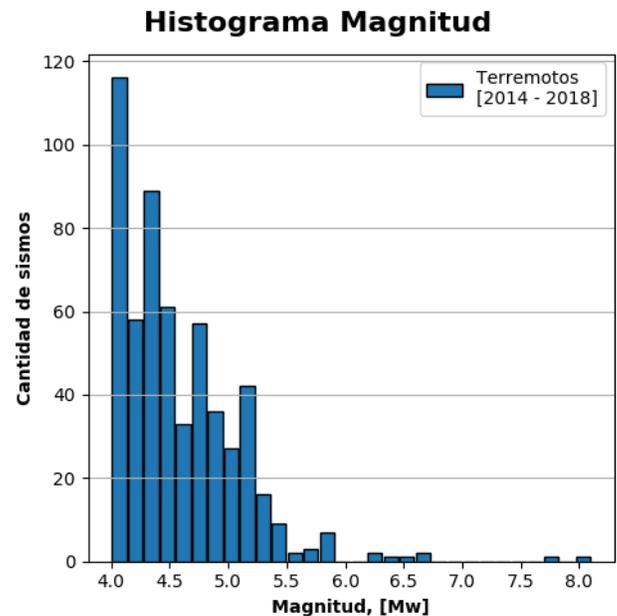


Figura 6 Histograma magnitud en base a la frecuencia de ocurrencia de eventos sísmicos y la magnitud de la actividad sísmica relacionándose con la ley de Gutenberg-Richter. En el eje x se posicionan las magnitudes de momento y en el eje y la cantidad de sismos. Las barras azules corresponden a terremotos adquiridos desde el año 2014 al 2018 los cuales están distribuidos mayoritariamente entre 4,0 Mw y 5,5 Mw. Existen solo dos terremotos de grandes magnitudes que corresponden al de Iquique de 8,2 Mw y la réplica de 7,6 Mw. Los demás sismos no sobrepasan los 7,0 Mw (Fuente: edición propia).

Al igual que el gráfico anterior, en la Figura 7 se muestra un histograma, pero de profundidades, indicando la localización de los sismos en todo el gap sísmico. La mayor cantidad se encuentran entre los 5 km a los 35 kilómetros de profundidad, disminuyendo la intensidad de registros hacia zonas más profundas hasta los 50 kilómetros en donde se asume como el límite en la cual ocurren los terremotos interplaca.

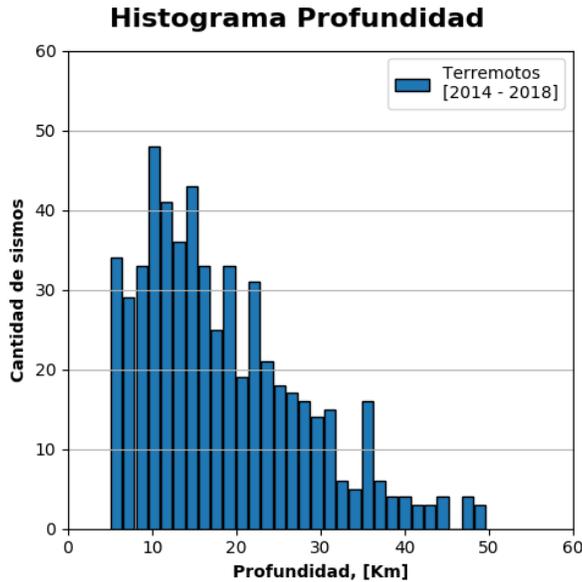


Figura 7 Histograma profundidad en base a la frecuencia de ocurrencia de eventos sísmicos y la profundidad hipocentral. En el eje X se posicionan las profundidades y en el eje Y la cantidad de sismos. Las barras azules corresponden a terremotos adquiridos desde el año 2014 al 2018. La distribución de los sismos probablemente tiene relación a la morfología de las placas en esa zona (Fuente: edición propia).

3.3 Forma funcional

Una de las obligaciones que pide el sistema de alerta temprana de terremotos (Kamigaichi, 2004) es que, tanto para la onda primaria (p) como secundaria (s), el modelo matemático se componga de cuatro términos los cuales son calibrados mediante los coeficientes a, b, c, d, e calculados por la regresión con el objetivo de que el resultado del lado derecho de la ecuación sea equivalente al desplazamiento máximo horizontal del suelo en escala logarítmica:

$$\log(PGD_p) = a_p M + b_p R + c_p \log(R) + d_p H + e_p + \varepsilon_p \quad (1)$$

$$\log(PGD_s) = a_s M + b_s R + c_s \log(R) + d_s H + e_s + \varepsilon_s \quad (2)$$

Donde,

- PGD : *Peak Ground Displacement* expresada en micrómetros [μm]. Es una variable dependiente o explicada en escala logarítmica la cual se obtiene mediante la segunda integración de los registros de aceleraciones, independiente de la regresión realizada.
- M : magnitud de momento [Mw]. Es una variable independiente o explicativa incorporada linealmente que

oscila en el dominio de $[4,0 - 9,0]$.

- R : distancia hipocentral expresada en kilómetros [Km]. Es una variable independiente o explicativa agregada al modelo matemático de forma lineal y en escala logarítmica. Esta variable representa teóricamente la disminución de la amplitud de la onda debido a la expansión geométrica del medio y a los efectos de anelasticidad respectivamente. R tiene dominio en $[5 - 500]$. La distancia hipocentral es calculada mediante pitágoras como $R = \sqrt{D^2 + H^2}$ en que D corresponde a la distancia entre el epicentro y la estación sismológica.
- H : profundidad focal expresada en kilómetros [Km]. Es una variable independiente o explicativa con dominio en $[5 - 50]$.
- a, b, c, d, e : coeficientes que son determinados para la onda primaria y secundaria mediante el método de regresión simple por los mínimos cuadrados ordinarios.
- ε : error, valor residual o perturbación que está compuesto por un parámetro independiente de variabilidad inter-evento (ε_{inter}) más un intra-eventos (ε_{intra}) que se expresa matemáticamente como $e = \varepsilon_{intra} + \varepsilon_{entre}$.

4. Análisis de residuales

Con el objetivo de evaluar estadísticamente la variabilidad entre valores observados de desplazamiento máximo horizontal del suelo versus los resultados predichos descritos por la curva del gap sísmico, se realiza el análisis de residuales mediante el modelo de efectos aleatorios propuesto por Abrahamson & Youngs (1992). Este algoritmo permite cuantificar la incertidumbre mediante un valor residual (Y) y ajusta los coeficientes, disminuyendo al máximo el error.

Se define Y como:

$$Y = \log\left(\frac{PGD_{observado}}{PGD_{predicho}}\right) \quad (3)$$

En la **Figura 8** a la izquierda muestra la variabilidad de los $\log(PGD)$ observados y predichos en función de la magnitud de momento para la onda P (arriba) y S (abajo) sin el ajuste de la variabilidad inter-evento e intra-evento y a la derecha se muestra la variabilidad luego de realizar el ajuste usando un modelo de efectos aleatorios (Abrahamson & Youngs, 1992).

Se observa que previo al ajuste, no es posible notar alguna tendencia. La variabilidad del desplazamiento del suelo no tiene una simetría entorno a la media 0 ya que oscila entre los $1,5 [10 \cdot \mu m]$ y $-1 [10 \cdot \mu m]$ para la onda P y entre $1,5 [10 \cdot \mu m]$ y $-0,75 [10 \cdot \mu m]$ para la onda S en sismos de magnitud 4 Mw disminuyendo este rango en dirección a las bajas frecuencias

debido a la cantidad de registros que se concentra mayoritariamente en los primeros valores de magnitud, concluyendo de que el modelo se encuentra sesgado. Este sesgo (*skew*) varía a medida que aumentan los valores de magnitud. En el rango $4 < M_w < 5$, se observa un sesgo positivo de los residuales al estar posicionados bajo la media 0 y luego, pasado 5Mw, los errores tienden a colocarse por sobre la media.

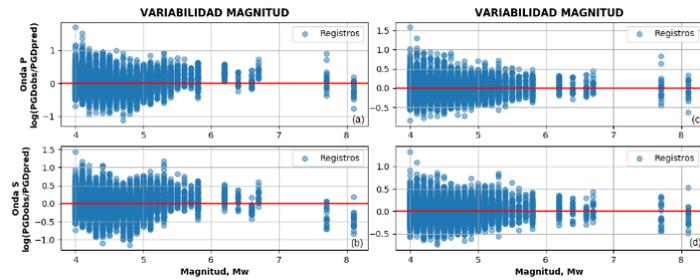


Figura 8 Variabilidad de los residuales en función de la magnitud, Mw del gap sísmico 1. (a) Residual sin ajuste onda P; (b) Residual sin ajuste onda S; (c) Residual con ajuste onda P; (d) Residual con ajuste onda S (Fuente: edición propia).

Luego de aplicar el método, los coeficientes se ajustan disminuyendo el error iterativamente hasta que se posicionan entorno a la media 0 como se observa en la 8.c y 8.d.

5. Resultados

Los mejores coeficientes obtenidos mediante la regresión de los mínimos cuadrados de la onda P para el *gap* sísmico del norte de Chile son:

$$\begin{aligned} a_p &= 0,74773 \\ b_p &= -0,00158 \\ c_p &= -0,62486 \\ d_p &= -0,00122 \\ \alpha_p &= -1,86583 \end{aligned}$$

Los mejores coeficientes obtenidos mediante la regresión de los mínimos cuadrados de la onda S para el *gap* sísmico del norte de Chile son:

$$\begin{aligned} a_s &= 1,02301 \\ b_s &= -0,00220 \\ c_s &= -0,51770 \\ d_s &= -0,00113 \\ \alpha_s &= -2,78261 \end{aligned}$$

El GMPE de Japón para la onda P (Kawaho et al., 2010) es:

$$\log(PGD_p) = 0,72M - 0,0005R - 1,2 \log(R) + 0,005H - 0,46$$

El GMPE de Japón para la onda S (Kiyomoto et al., 2009) es:

$$\log(PGD_s) = 0,87M - 0,0019R - \log(R) + 0,005H - 0,98$$

Calculando el PGD_p y PGD_s , en la **Figura 9** se muestra gráficamente el efecto que busca explicar la ecuación de predicción de movimiento fuerte del suelo para la onda primaria (P) y secundaria (S) en que cada punto en color azul corresponde al PGD calculado por cada estación sismológica en función de la magnitud M_w . Se observa que, para valores menores de magnitud, existe una pérdida de desplazamiento (PGD) registrada en cada estación sismológica para un filtro pasabanda de 0,16667 Hz a 1 Hz. Es importante mencionar que este rango de frecuencias fue utilizado debido a que las frecuencias bajas registradas en las señales de las trazas de aceleración generarían datos indeseados en términos de desplazamiento.

Respecto al gráfico de la onda S, el *Peak Ground Displacement*, para una misma estación, aumenta en función de la magnitud. Este efecto se ve claramente en eventos con $M_w > 7$ desde los $10^3 [10 \cdot \mu m]$ a $10^4 [10 \cdot \mu m]$ aproximadamente en valores de magnitudes de momento mayores a 5,0 en comparación con los registros de la onda P.

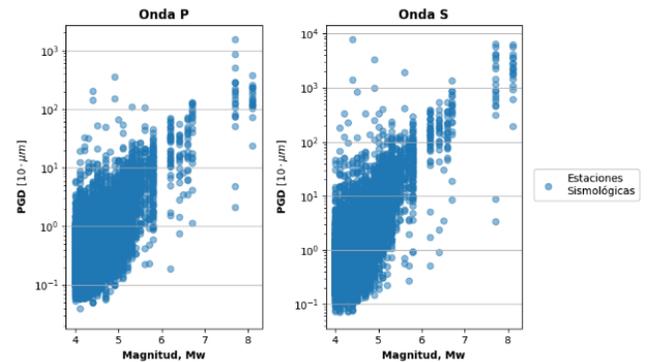


Figura 9 $\log(PGD)$ v/s Magnitud de momento para onda P y S (Fuente: edición propia).

A continuación, a modo de ejemplo se muestran 3 de los 588 gráficos que existen en total de $\log(PGD)$ v/s distancia hipocentral (ver Figura 10, Figura 11, Figura 12).

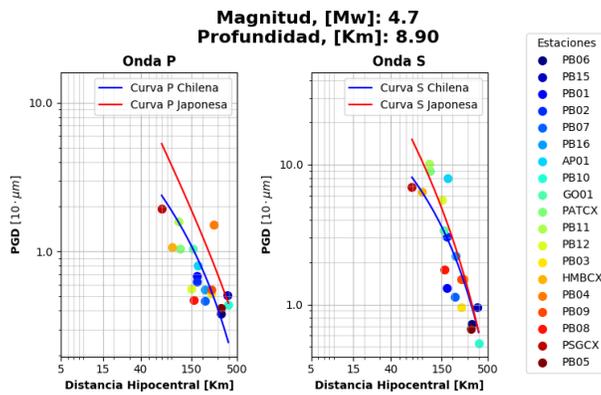


Figura 10 GMPEs Chile/Japón para 4,7Mw a 8,9 Km con un error interevento onda P de -0,024492 y onda S de -0,010953 (Fuente: edición propia).

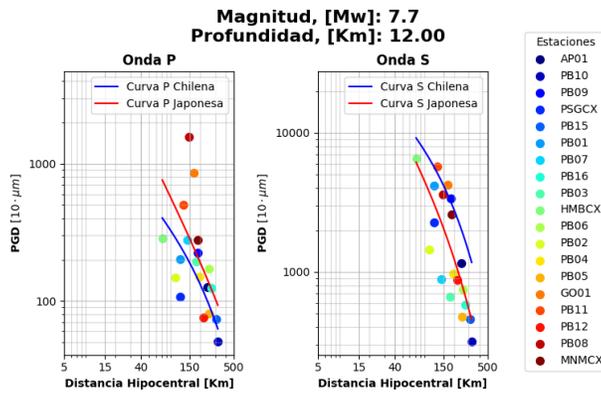


Figura 11 GMPEs Chile/Japón para 7,7Mw a 12 Km con un error interevento onda P de 0,081665 y onda S -0,261241 (Fuente: edición propia).

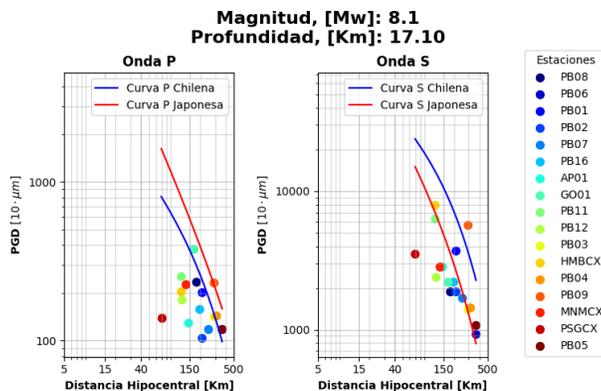


Figura 12 GMPEs Chile/Japón para 8,1Mw a 17,1 Km con un error interevento onda P de -0,139080 y onda S -0,344131 (Fuente: edición propia).

La curva azul del gráfico representa la curva chilena y la roja a Japón. Se observa que, los valores de desplazamiento máximo horizontal de suelo muestran la tendencia al efecto de atenuación

que busca este estudio, ya que mientras más cerca a la fuente sísmica, se esperaría un PGD mayor a excepción del evento 8,1Mw Iquique 2014 onda P que la nube de puntos es más dispersa, probablemente por la saturación del equipo. Sin embargo, los coeficientes de Chile explican bastante bien los valores de desplazamiento a diferencia de la ecuación japonesa en color rojo.

Dado que el histograma de magnitud (Figura 6) muestra una mayor cantidad de datos en sismos con Mw que oscilan entre 4,0 a 5,5, es importante analizar la predicción de la magnitud de los sismos más importantes con Mw mayor a 7,0 ya que solo existe un evento por cada uno de estos eventos y son los que registran un movimiento fuerte mucho mayor en comparación a los demás.

Entonces, analizando el sismo 7,7Mw Iquique, 3 de abril del 2014 a las 02:43:14 hrs., se observa una variabilidad de magnitud predicha con porcentaje de error que varía entre -8,95% equivalente a 7,01Mw a un 14% correspondiente a 8,8Mw (ver Figura 13).

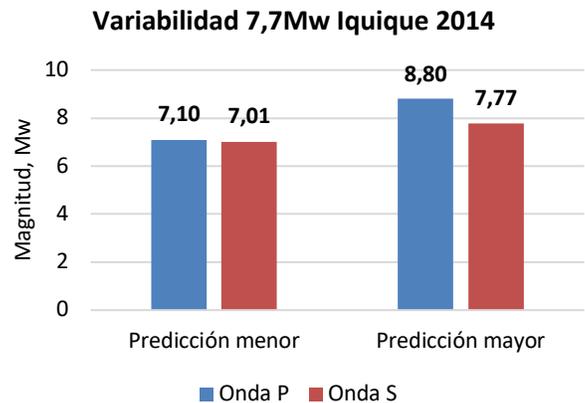


Figura 13 Variabilidad predicción magnitud de momento para evento 7,7Mw a 12 Km (Fuente: edición propia).

Se obtiene que la mejor predicción de magnitud es con la onda S ya que el porcentaje de error es de 0,9% equivalente a 7,77Mw.

Por último, se realiza el mismo análisis, pero con el sismo 1 de abril del 2014 Mw8,1 Iquique a las 23:46:47 hrs. Se observa una variabilidad de magnitud predicha con porcentaje de error que varía entre -10,2% equivalente a 7,27Mw a un 5,5% correspondiente a 8,54Mw (ver Figura 14).

Nuevamente se obtiene que la mejor predicción de magnitud es con la onda S ya que el porcentaje de error es de un 2,2% correspondiente a un 8,28Mw.

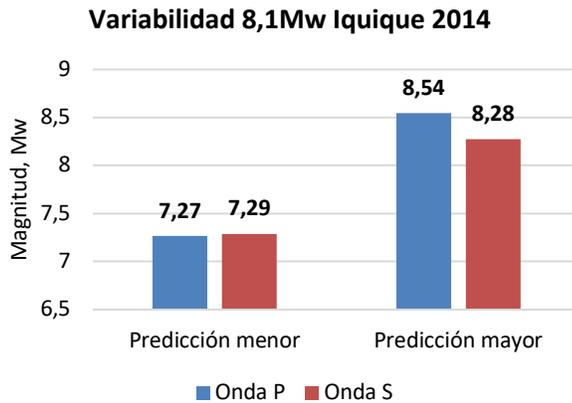


Figura 14 Variabilidad predicción magnitud de momento para evento 8,1Mw a 17,1 Km (Fuente: edición propia).

6. Discusión

Si bien en una primera instancia la curva de Japón podría ser comparable con la ecuación de Chile dada que ambas son para terremotos que tienen origen en un contexto tectónico similar (zonas de subducción), es importante mencionar que el sistema de alerta temprana japonés no hace distinción entre los distintos tipos de sismos. Los coeficientes de Chile tienen una aplicabilidad solo para sismos interplaca.

Existen estudios como el de Atkinson & Boore (2003), el cual menciona que las curvas de atenuación o *GMPEs* funcionan solo para zonas específicas con características geotectónicas similares por lo que es posible suponer en una primera instancia que los coeficientes de Japón no precederían un desplazamiento máximo horizontal del suelo certero para Chile.

Aunque la mayoría de las ecuaciones de atenuación desarrolladas por autores como Contreras & Boroschek (2012); Idini, Rojas, Ruiz, & Pastén (2016), parametrizan la relación empírica con PGA dado que los datos provienen de acelerógrafos, en este estudio se desarrollaron ecuaciones con PGD utilizando datos de trazas de aceleraciones por dos razones: el sistema de alerta temprana de terremotos utiliza una red de acelerógrafos, los cuales entregan un dato indirecto de desplazamiento, pero en tiempo real si lo comparamos con la información que entrega la red de GPSs (no presenta niveles de saturación y registra la posición de un lugar varias veces por segundo con una precisión exacta, pero se requiere de tiempo para el traspaso de la información dada su posición satelital) y segundo, el desplazamiento es el parámetro que mejor describe el movimiento fuerte del suelo a diferencia de la aceleración y la velocidad debido a que la máxima amplitud de aceleración no es equivalente al máximo movimiento o

desplazamiento y finalmente, lo que se busca en esta investigación, es cuantificar la percepción del sismo cuantificado por la intensidad.

Como se mencionó en el párrafo anterior, puesto que el desplazamiento es un dato indirecto ya que se obtiene de la segunda integración de las trazas de aceleración, se reduce esta incertidumbre aplicando filtros de frecuencias.

Por otro lado, considerando que el sistema de alerta temprana de Japón se basa en el método del diferencial de velocidades de las ondas sísmicas, implementar el nuevo sistema japonés en Chile implica aproximadamente de tan solo 20 segundos de alerta a la población desde que se activa la primera estación sísmológica ubicada en la costa del continente debido a la onda P hasta la llegada de la onda S en la ciudad, la cual es la responsable de generar el movimiento fuerte.

En base a esto, ambas relaciones empíricas son importantes ya que, si bien la onda P entrega mayor tiempo de alerta por llegar más rápido y activar las primeras estaciones sísmológicas, la onda secundaria ayuda a calibrar la información del terremoto y con ello, ajustar la capacidad de predicción de la magnitud como se analizó en el ítem anterior.

Por último, no es factible incluir en la ecuación de predicción del movimiento fuerte del suelo parámetros que cuantifiquen el efecto de sitio ya que la amplitud decae a altas frecuencias en desplazamiento por lo que no habría información de aquello.

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo son confiables para un rango de 4,0Mw a 8,1Mw dada la buena base de datos, densidad de estaciones sísmológicas distribuidas espacialmente por todo el *gap* sísmico y variabilidad estadística. Tomando en cuenta que, si bien existen bajos registros de eventos sísmicos con Mw mayor a 7,0, se comprobó mediante el análisis de variabilidad que la capacidad de predicción Mw de los *GMPEs* funciona para establecer umbrales de magnitud y en base a ello, generar planes de acción y/o protocolos a la comunidad.

La mayor variabilidad de residuales ocurre en sismos de baja magnitud ya que hay mucha incertidumbre en su localización y por la caída de tensiones.

Considerando que el objetivo de esta investigación es estimar una intensidad sísmica que permita cuantificar la percepción del sismo, es importante tener en cuenta el efecto de sitio. Este parámetro se propone trabajarlo como una ponderación posterior a la predicción de magnitud en base a los mapas de

microzonificación sísmica de Chile.

Finalmente, se está trabajando para que, en un futuro, los sistemas de alerta temprana de terremotos puedan funcionar con una red de *GPSs*, ya que entregan datos de desplazamiento exactos. En este contexto, se hace necesario desarrollar ecuaciones empíricas parametrizadas con PGD.

8. Referencias

- [1] Abrahamson, N. A., & Youngs, R. R. (February de 1992). A stable algorithm for regression analyses using the random effects model. *Bulletin of the Seismological of America*, 82(1), 505-510.
- [2] Atkinson, G. M., & Boore, D. M. (August de 2003). Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4), 1703–1729.
- [3] Comte, D., & Pardo, M. (1991). Reappraisal of Great Historical Earthquakes in the Northern Chile and Southern Peru Seismic Gaps. *Natural Hazard*.
- [4] Contreras, V. (2009). Curvas de atenuación espectrales para sismos chilenos. En U. d. Chile, Memoria para optar al título de ingeniero civil. Santiago de Chile.
- [5] Contreras, V., & Boroschek, R. (2012). Strong Ground Motion Attenuation Relations for Chilean Subduction Zone Interface Earthquakes. WCEE. Lisboa.
- [6] Contreras, V., & Boroschek, R. (2015). Curvas de atenuación para sismos chilenos. XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015.
- [7] Espinoza, M. (2017). Análisis de la demanda sísmica de diferentes tipos de sismos chilenos en base a la atenuación de alta frecuencia. En Universidad de Chile, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago.
- [8] Houston, H., & Kanamori, H. (August de 1990). Comparison of strong-motion spectra with teleseismic spectra for three magnitude 8 subduction-zone earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(4), 913-934.
- [9] Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., & Pastén, C. (2016). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bull Earthquake Eng.*
- [10] Kamigaichi, O. (2004). JMA Earthquake Early Warning. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*.
- [11] Kawaho, A., Shinji, K., Toshihiro, S., Moriwaki, K., & Takashi, Y. (2010). 緊急地震速報におけるP波マグニチュード推定方法の改善. *Quarterly Journal of Seismology*, 73, 123-134.
- [12] Kiyomoto, M., Aketagawa, T., Ohtake, K., Shimbaru, T., Shimoyama, T., Moriwaki, K., . . . Yokota, T. (8 de October de 2009). Investigation of Technical Issues for Earthquake Early Warning. *Quarterly Journal of Seismology*, 73, 135-150.
- [13] Melnick, D., Sanchez, M., Echtler, H., & Pineda, V. (2003). Geología estructural de la isla Mocha, centro-sur de Chile (30°30'S, 74°W): implicancias en la tectónica regional.
- [14] United States Geological Survey (USGS). (17 de 10 de 2018). M 8.2 - 94km NW of Iquique, Chile. Obtenido de <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usc000nzvd/finite-fault>
- [15] Wu, S., Yamada, M., Tamaribuchi, K., & Beck, J. (2015). Multi-events Earthquake Early Warning algorithm using a Bayesian approach. *Geophysical Journal International* .



A. Anexo

Información de la red de acelerógrafos.

A.1 Red de acelerógrafos

Tabla A.1 Red de acelerógrafos

Código estación	Responsable	RED	Latitud [°]	Longitud [°]	Altura [m]	Digitalizador	BB	Acelerómetro
AC01	CTR-DIR	C1	-26,1	-70,6	390	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
AC02	CTR-DIR	C1	-26,8	-69,1	39905	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
AC03	DGAC	C1	-27,3	-70,4	321	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
AC04	CTR-DIR	C1	-28,2	-71,1	2703	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
AC05	CTR-DIR	C1	-28,8	-70,3	12864	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
AF01	CTR-GER	C1	-23,0	-68,2	2449	Q330	Trillium 120p	FBA ES-T
AGCH	INTERNET	C	-37,8	-72,7	76	Earth Data	-	Episensor FBA
ANTU	INTERNET	C	-33,6	-70,6	640	Earth Data	-	Episensor
AP01	DGAC	C1	-18,4	-70,3	21	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
ARCH	INTERNET	C	-18,5	-70,3	58	Sara	-	Episensor FBA
BIO2	CTR-DIR	C1	-36,7	-71,3	913	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
BIO3	INTERNET	C1	-36,8	-73,0	196	Q330	Trillium 120	CMG-5T
BIO4	CTR-DIR	C	-38,4	-73,9	61	Q330	Trillium 120	CMG-5T
BO01	CTR-DIR	C1	-34,4	-71,1	2625	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
BO02	CTR-DIR	C1	-34,8	-70,8	886	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
BO03	CTR-DIR	C1	-34,5	-72,0	128	Q330	Trillium 120	CMG-5T
CHPI	INTERNET	C	-34,4	-72,0	20	Altus Makalu	-	Episensor FBA
CO01	CTR-DIR	C1	-30,0	-70,1	21574	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
CO02	INTERNET	C1	-31,2	-71,0	1190	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
CO03	CTR-DIR	C1	-30,8	-70,7	9903	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
CO04	CTR-DIR	C1	-32,0	-71,0	2401	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
CO05	3G	C1	-29,9	-71,2	101	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
CO06	CTR-DIR	C1	-30,7	-71,6	239,7	Q330	Trillium 120p	FBA ES-T
CRCH	INTERNET	C	-26,3	-70,7	10	Earth Data	-	Episensor FBA
DG01	INTERNET	C1	-33,5	-70,7	609	Q330	Trillium 120	Episensor
FAR1	INTERNET	C	-33,3	-70,3	2270	Q330	Trillium 40	Episensor
FSR	RADIO	C	-33,5	-70,5	781	Earth Data	-	Episensor FBA
GO01	TESACOM-DIR	C	-19,7	-69,2	3809	Q330	T240	Episensor
GO02	TESACOM-DIR	C	-25,2	-69,6	2550	Q330	T240	Episensor
GO03	TESACOM-DIR	C	-27,6	-70,2	730	Q330	T240	Episensor
GO04	INTERNET	C	-30,2	-70,8	2076	Q330	T240	Episensor
GO05	INTERNET	C	-35,0	-71,9	488	Q330	T240	Epi



Código estación	Responsable	RED	Latitud [°]	Longitud [°]	Altura [m]	Digitalizador	BB	Acelerómetro
GO06	TESACOM-DIR	C	-39,6	-71,5	1258	Q330	T240	Epi
HMBCX	INTERNET	CX	-20,3	-69,9	1152	Q330	STS2	CMG5
LAJA	INTERNET	C	-37,3	-72,7	84	Basalt	-	Episensor FBA
LC01	CTR-DIR	C1	-38,9	-71,9	471	Q330	Trillium 120	CMG-5T
LC02	CTR-DIR	C1	-38,8	-73,4	67	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
LCO	INTERNET	IU	-29,0	-70,7	2299	Q680	STS1	FBA-23
LMEL	CTR-DIR	C	-33,8	-70,2	1510	Q330	STS-2	Episensor
LVC	INTERNET	IU	-22,6	-68,9	2195	Q330	STS1-STS2	FBA ES-T
ME03	RADIO	C1	-33,5	-70,5	1087	Q330	Trillium 120	Episensor
ML02	INTERNET	C1	-35,8	-71,4	237	Q330	Trillium 120	CMG-5T
MNMCX	INTERNET	CX	-19,1	-69,6	2304	Q330	STS2	CMG5
MT01	CTR-DIR	C1	-33,9	-71,3	310	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
MT02	CTR-DIR	C1	-33,3	-71,1	323	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
MT05	RADIO	C1	-33,4	-70,7	765	Q330	Trillium 120	CMG-5T
MT07	-	C1	-33,0	-71,0	2234	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
MT09	RADIO	C1	-33,8	-71,0	1371	Q330	Trillium 120	CMG-5T
PATCX	INTERNET	CX	-20,8	-70,2	830	Q330	STS2	CMG5
PB01	CTR-GER	CX	-21,0	-69,5	900	Q330	STS2	Epi
PB02	CTR-GER	CX	-21,3	-69,9	1015	Q330	STS2	Epi
PB03	TESACOM-DIR	CX	-22,0	-69,8	1460	Q330	STS2	Epi
PB04	CTR-GER	CX	-22,3	-70,1	1520	Q330	STS2	Epi
PB05	TESACOM-DIR	CX	-22,9	-70,2	1150	Q330	STS2	Epi
PB06	CTR-GER	CX	-22,7	-69,6	1400	Q330	STS2	Epi
PB07	CTR-GER	CX	-21,7	-69,9	1570	Q330	STS2	Epi
PB08	CTR-GER	CX	-20,1	-69,2	3060	Q330	STS2	Epi
PB09	CTR-GER	CX	-21,8	-69,2	1530	Q330HR	STS2	Epi
PB10	DGAC	CX	-23,5	-70,6	250	Q330HR	STS2	Epi
PB11	CTR-GER	CX	-19,8	-69,7	1300	Q330HR	STS2	Epi
PB12	DGAC	CX	-18,6	-70,3	908	Q330HR	STS2	Epi
PB14	CTR-GER	CX	-24,6	-70,4	2640	Earthdata PS6-24	STS2	Epi
PB15	CTR-GER	CX	-23,2	-69,5	1830	Q330HR	STS2	Epi
PB16	DGAC	CX	-18,3	-69,5	4800	Q330HR	STS2	Epi
PEL	INTERNET	G	-33,1	-70,7	690	Q330HR	STS-1	Episensor
PSGCX	INTERNET	CX	-19,6	-70,1	966	Q330	STS2	CMG5
RCDM	RADIO	C	-33,5	-70,8	465	Earth Data	-	FBA ES-T
ROC1	INTERNET	C	-33,0	-71,0	2186	Q330	Trillium 40	Episensor
STL	INTERNET	C1	-33,4	-70,6	616	Q330	Trillium 120	CMG-5T
TA01	DGAC	C1	-20,6	-70,2	75	Q330	Trillium 120p	CMG-5T



Código estación	Responsable	RED	Latitud [°]	Longitud [°]	Altura [m]	Digitalizador	BB	Acelerómetro
TA02	INTERNET	C1	-20,3	-70,1	865	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
VA01	INTERNET	C1	-33,0	-71,6	2	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
VA03	CTR-DIR	C1	-32,8	-70,6	1053	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
VA05	DGAC	C1	-33,7	-71,6	80	Q330	Trillium 120	CMG-5T



Análisis de redes sociales aplicado a los procesos de gestión de proyectos según Project Management Body of Knowledge en la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción.

Social network analysis, applied to project management processes by Project Management Body of Knowledge in architecture, engineering and construction industry.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido

14-01-2019

Aceptado

09-04-2019

Publicado

29-04-2019

Palabras Clave:

PMBOK.

Gestión.

Proyectos.

Análisis de Redes

Sociales.

Arquitectura Ingeniería y

Construcción.

Article history:

Received

14-01-2019

Accepted

09-04-2019

Available

29-04-2019

Keywords:

PMBOK.

Project.

Management.

Social Network Analysis.

Architecture Engineering

and Construction.

C. Lobos¹, J. Matus¹, C. Santelices¹

¹Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile

carlos.santelices.r@mail.pucv.cl, teléfono: +56 9 8310 8237

Resumen

Con el objetivo de encontrar el real nivel de integración entre los 49 procesos de la guía PMBOK®, se realiza un análisis a través del método de redes sociales (SNA), el cual mediante la teoría de grafos se explican las relaciones entre nodos basándose en indicadores matemáticos. Según estos resultados y con respecto a las métricas obtenidas, queda en evidencia la dependencia recíproca entre los procesos, demostrándose el rol fundamental del grupo de procesos denominado "Planificación", que define las condiciones de borde del proyecto, es decir, el espacio dentro del cual ocurren todos los demás procesos. Se descubre una red compacta, con un efectivo nivel de integración entre los diferentes procesos propuestos por la guía de las buenas prácticas PMBOK®. En conjunto, se entregan recomendaciones aplicables a la industria de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AIC) para la gestión de proyectos.

Abstract

In order to find the real integration level between the 49 processes of the PMBOK® guide, an analysis is made through the social networks method (SNA), which through graph theory explains the relationships between nodes based on mathematical indicators. According to these results and in relation to the obtained metrics, the reciprocal dependence between the processes is evident, demonstrating the fundamental role of the group of processes called "Planning", which defines the border conditions of the project, that is, the space within the project. which all the other processes occur. A compact network is discovered, with an effective level of integration between the different processes proposed by the PMBOK® good practices guide. Recommendations applicable to Architecture, Engineering and Construction (AIC) industry are given for project management.



1. Introducción

Los proyectos nacen como resultado de la identificación de un problema y de la búsqueda de alternativas de solución para mejorar las condiciones de un cierto grupo de estudio, los cuales están referidos a un esfuerzo temporal para elaborar un servicio o producto único. En el caso de los proyectos de Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AIC) que son considerados como uno de los más complejos de la industria, dadas las variables que involucra como: la gran cantidad de participantes, el flujo de información, los detalles de diseño, entre muchos otros, los convierte en un gran desafío para la ingeniería moderna (Baccarini, 1996).

Actualmente existen diversas metodologías y herramientas para llevar a cabo una eficiente gestión de proyectos, como por ejemplo Last Planner System, Kanban, Scrum, Building Information Modeling (BIM), etc. Una de las herramientas más usadas a nivel mundial es la guía del PMBOK. De acuerdo con la guía PMBOK® (Project Management Institute, 2017), se espera que un director de proyecto gestione a lo más 49 procesos según los requisitos del caso incluyendo las siguientes diez áreas de conocimiento: Integración, Alcance, Cronograma, Costo, Calidad, Recursos, Comunicaciones, Riesgo, Adquisiciones e Interesados (Stakeholders).

Una gran cantidad de problemas aquejan a la industria AIC al momento de gestionar, de ahí la importancia de realizar un análisis de redes sociales para dar respuesta a uno de los elementos más cuestionados sobre la herramienta de Dirección de Proyectos propuesta por la guía de buenas prácticas PMBOK; dicha interrogante corresponde a medir qué tan eficiente es la interacción de los procesos, aprovechando las facultades de los modernos softwares de programación y modelación como Phyton y Gephi, posteriormente modelar una representación visual del comportamiento de la red y obtener métricas matemáticas para cuantificar las diferentes relaciones existentes. Este tipo de análisis no se ha realizado antes sobre el PMBOK por lo tanto los resultados podrán tomarse como base para futuras investigaciones del tema.

2. Dirección de Proyectos y Análisis de Redes Sociales

La Dirección de Proyectos es la aplicación de un grupo de herramientas y técnicas para dirigir el uso de diversos recursos hacia la realización de una compleja y única, que está dentro de las limitaciones de cronograma, costo y calidad (Atkinson, 1999). A través de esto, es posible evaluar la factibilidad en la realización del proyecto, y optimizar el proceso mejorando el resultado y solución a la problemática inicial.

La planificación del proyecto implica especificar un conjunto de decisiones sobre la forma de trabajar para su posterior ejecución. De esta manera, se toman optimas decisiones adoptando metodologías para administrar los recursos provenientes de una o más fuentes de financiamiento, permitiendo tener una previa programación, que puede estar sujeta a cambios y actualizaciones en un futuro, y además un mejor control sobre los agentes a ejecutar. Por ejemplo, para caso de un proyecto AIC (industria de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción), interesados, mano de obra, materiales, maquinaria, equipos, cronograma, costos, riesgos y todos aquellos otros factores que puedan ser importantes según las características del proyecto en estudio. Es así como se busca lograr el equilibrio y cumplir con el alcance, tiempos, presupuesto y estándares de calidad.

La guía del PMBOK incluye un total de 49 procesos, de los cuales 24 son de planificación. Siendo estos, aproximadamente el 49% de todos los procesos. El objetivo principal de la planificación es establecer un conjunto de instrucciones con suficiente detalle para que el equipo del proyecto pueda saber qué se debe hacer, cuándo se debe hacer y qué recursos usar para lograr con éxito el producto del proyecto. (Meredith & Mantel, 2006). Los principales beneficios de una buena planificación son: eliminar o reducir la incertidumbre, mejorar la eficiencia de la operación, obtener una mejor comprensión de los objetivos del proyecto y proporcionar una base para monitorear y controlar el trabajo. (Kerzner, 2006).

Dentro de las principales funciones de una oficina de gestión de proyectos están proveer de metodologías, dar soporte para las gestiones capacitando al personal, asignar directores y ser responsable del proyecto (Hobbs et al, 2008). La oficina de Gestión de Proyectos basa su metodología en la aplicación de recomendaciones provenientes de diferentes organizaciones. Algunas de las oficinas más reconocidas en el mundo encargadas de fomentar las buenas prácticas en la gestión de proyectos son: Project Management Institute (PMI), International Project Management Association (IPMA), The Association for Project Management (APM), PRINCE2 (Projects in Controlled Environments), Asia Pacific Federation of Project Management (APFPM) y la Norma Internacional ISO 21500:2012 (Kovács, 2004).

Los análisis de redes sociales (SNA) utilizan la teoría de grafos para explicar relaciones a partir de indicadores matemáticos, tales como: la densidad, longitud y diámetro de la red entre otros (Marin & Wellman, 2011). En un SNA se definen dos elementos fundamentales: nodos y aristas. Los nodos son elementos que permiten la entrada y salida de recursos, mientras que las aristas son los vínculos entre dos nodos, las cuales pueden ser flujos de información o de recursos. Gephi es una poderosa herramienta libre y de fácil acceso con la cual se pueden realizar grafos según

una base de datos, además permite calcular diversos parámetros para realizar un completo análisis de redes sociales.

3. Metodología

Cada proceso descrito en el PMBOK tiene la estructura: “Entradas”, “Herramientas y Técnicas” y “Salidas”. Entendiendo que cada Salida de un proceso específico se convierte en una entrada de otro proceso, es posible cuantificar la relación entre los 49 procesos contabilizando este flujo desde salidas a entradas.

Para estudiar esta interacción se puede utilizar la técnica del análisis de redes sociales (SNA) considerando las métricas de las **Tablas 1 y 2**.

Tabla 1 Descripción de las métricas generales en análisis de redes sociales (Cherven, 2013)

Métrica	Descripción
Density (Densidad)	Mide cuántos enlaces existen entre nodos divididos por el número total de interacciones posibles para reflejar la cohesión de la red.
Average Degree (Grado promedio)	Número de conexiones promedio que tiene cada nodo dentro de la red
Average Weighted degree (Grado medio ponderado)	La suma promedio de los pesos de aristas conectada a cada nodo.
Diameter (Diámetro)	Representa la cantidad de nodos de distancia entre los dos nodos más alejados entre sí de la red
Average path length (Longitud promedio de recorrido)	Cuántos pasos, en promedio, requieren los nodos para llegar a otro nodo
Modularity (Modularidad)	Cuán densas son las conexiones entre los nodos dentro de los grupos en comparación con otros grupos
Clustering (Agrupación)	Métrica que representa una comparación entre los grupos de nodos agrupados con el resto de la red, lo que indica la existencia de pequeñas comunidades

Tabla 2 Métricas de nodos en análisis de redes sociales (Cherven, 2015).

Métrica	Descripción
Degree (Grado)	Es el número de relaciones (aristas) de los nodos
Indegree (Grado de entrada)	Esta medida dice cuán probable es que otros nodos busquen un nodo en particular, sea cual sea el atributo que hace que este miembro sea un objetivo atractivo para los demás nodos
Outdegree (Grado de salida)	Se define como las conexiones que fluyen desde un nodo seleccionado a otros nodos miembros de la red
Weighted Indegree And Weighted Outdegree (Grados de entrada y salidas ponderados)	Por lo general, el grado se ha extendido a la suma de los pesos al analizar las redes ponderadas y la atracción del nodo etiquetado, por lo que se calcula el grado de entrada y grado de salida ponderado
Eccentricity (Excentricidad)	Se refiere al número de pasos requeridos para que un nodo individual cruce la red. Este número está limitado por el diámetro del gráfico
Closeness Centrality (Cercanía de Centralidad)	Representa el interesante caso, en el que el nodo seleccionado podría estar mal conectado en un sentido directo, pero aun así es muy influyente debido a la proximidad de nodos vecinos bien conectados
Betweenness Centrality (Centralidad mutua)	Corresponde al nivel en el que cualquier nodo sirve como un puente que conecta otros nodos
Modularity class (Clase de Modularidad)	Representa la comunidad a la que pertenece cada nodo de la red
Clustering (Agrupación)	Proporciona una medida de la capacidad o nivel en el que los nodos están agrupados, en lugar de estar conectados de manera igual o aleatoria a través de la red
Eigen Centrality (Centralidad propia)	Cuando los nodos están altamente conectados a otros nodos con altos niveles de influencia, el resultado será un alto nivel de centralidad propia. En este caso, no es simplemente estar conectado a muchos otros nodos que son críticos, sino que es primordial estar conectado a los nodos más influyentes

Para modelar los 49 procesos con las redes sociales, cada uno de los procesos se definió como un nodo con parámetros característicos del grupo de procesos y área de conocimiento al que pertenecen. Por otro lado, para definir las aristas entre los nodos se realizó un conteo del número de elementos de salida de un proceso que se convierten en elemento de entrada de otro proceso, tal y como se representa en el algoritmo realizado en Python (Figura 1). Por lo tanto, la fuerza de la interacción podría ser inexistente (weight=0) o existente (weight= [1, 2, 3, 4,..., N]),

de esta forma, se considera como supuesto que todas las salidas tienen la misma importancia.

Además, se tomaron algunas consideraciones para las equivalencias entre entradas y salidas, como las que expresan a continuación: “Información desempeño de trabajo” como proceso equivalente a “Informe desempeño de trabajo”,

“Solicitud de cambio” a “Solicitud de cambio aprobado”, “Plan para la dirección del proyecto” a “Actualización al plan para la dirección del proyecto”, “Documentos del proyecto” a “Actualización a los Documentos del proyecto” y “Activos de los procesos de la organización” a “Actualización a los activos de los procesos de la organización”.

```
import numpy as np #Libreria
N = 49 #Tamaño de matriz cuadrada, cada elemento representa uno de los 49 procesos
MTabla = np.zeros((N+1,N+1)) #Matriz de ceros
dictionary={1:[['input1','input2', 'input3', 'input4'],['output1','output2']],
            2:[['input5','input6', 'input7', 'input8'],['output3']],
            3:[['input9','input10', 'input11', 'input12','input13'],['output4','output5','output6','output7','output8']],
            4:[['input14','input15', 'input16', 'input17','input18'],['output11','output12','output13']],
            #
            #
            #
            49:[['outputs del proceso numero 49],[inputs del proceso numero 49]],
            }

for i in range (N):
    for j in range (N): #Iteración sobre filas y columnas de la matriz de ceros
        if i != j: #Excluye la diagonal
            Mtemp1 = dictionary.get(i+1) #Arreglo que saca el primer proceso del diccionario
            Mtemp2 = dictionary.get(j+1) #Arreglo que saca el segundo proceso del diccionario
            MTabla[i+1][j+1] = len(set(Mtemp1[0]) & set(Mtemp2[1])) #Contador de elementos coincidentes entre ambos arreglos
            MTabla[i][0] = i #Agrega una fila que indica a que proceso se refiere
            MTabla[0][j] = j #Agrega una columna que indica a que proceso se refiere
MTabla[N][0] = N #Muestra el último número de proceso en la fila
MTabla[0][N] = N #Muestra el último número de proceso en la columna

#Setear para el caso particular de 'outputs de todos los demás procesos' en el proceso 2:
for i in range (N): #Se considera solo la fila del proceso 2
    if i !=1: #Evita setear en la diagonal
        Mtemp1 = dictionary.get(i+1) #Obtiene el proceso 1 del diccionario
        MTabla[2][i+1] = len(Mtemp1[1]) #Asigna la cantidad de elementos en la salida del proceso 1

print(MTabla)
```

Figura 1 Algoritmo en Python de cada arista.

Luego de definir todos los vínculos (aristas) entre todos los procesos (nodos), se procedió a calcular todas las métricas de grafo descritas en la Tabla 1 y de nodo descritas en la Tabla 2. Las métricas de grafo son: density (densidad), average degree (grado promedio), average weighted degree (grado medio ponderado), diameter (diámetro), average path length (longitud promedio de recorrido), modularity (modularidad) and clustering (agrupación). Las métricas por proceso son: degree (grado), indegree (grado de entrada), outdegree (grado de salida), weighted indegree (ponderado de entrada), weighted outdegree (ponderado de salida), eccentricity (excentricidad), closeness centrality (cercanía de centralidad), betweenness centrality (centralidad mutua), modularity class (rango de modularidad), clustering (agrupación) and eigen centrality (centralidad propia). Además, de forma visual se hizo un análisis clasificando los nodos con sus respectivas áreas de conocimiento y grupos de procesos. Para el cálculo de las

métricas y representación gráficas de las redes se utilizó el software libre Gephi v.0.9.1.

Finalmente, se analizaron los cambios de las métricas cuando se filtran algunas áreas de conocimiento, con el objetivo de entender la importancia de algunas de ellas como ente integrador con otras áreas.

4. Resultados

A continuación, en la Tabla 3 y Tabla 4 se presentan los valores de las métricas que arroja el análisis de redes sociales y por otro lado, promedios y desviación estándar para los nodos.

Tabla 3 Valores de métricas obtenidos de la red.

Métrica	Valor
Density (densidad)	0.83
Average Degree (grado medio)	39.857
Average Weighted degree (grado medio ponderado)	78.041
Diameter (diámetro)	3
Average path length (longitud promedio de recorrido)	1.172
Modularity (modularidad)	0.023
Clustering (agrupación)	0.873

Tabla 4 Promedio y desviación estándar para métricas SNA.

Métrica	Promedio	Desviación estándar
Degree (grado)	79.71	18.59
Indegree (grado de entrada)	39.86	5.47
Outdegree (grado de salida)	39.86	15.48
Weighted indegree (grado de entrada ponderado)	78.04	22.12
Weighted outdegree (grado de salida ponderado)	78.04	48.45
Eccentricity (excentricidad)	1.90	0.59
Closeness centrality (centralidad de cercanía)	0.90	0.16
Betweenness centrality (centralidad mutua)	8.18	40.91
Modularity class (rango de centralidad)	1.12	0.81
Clustering (agrupamiento)	0.87	0.05
Eigen Centrality (centralidad propia)	0.85	0.12

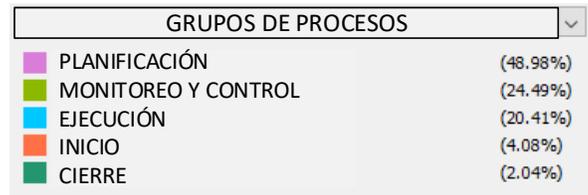
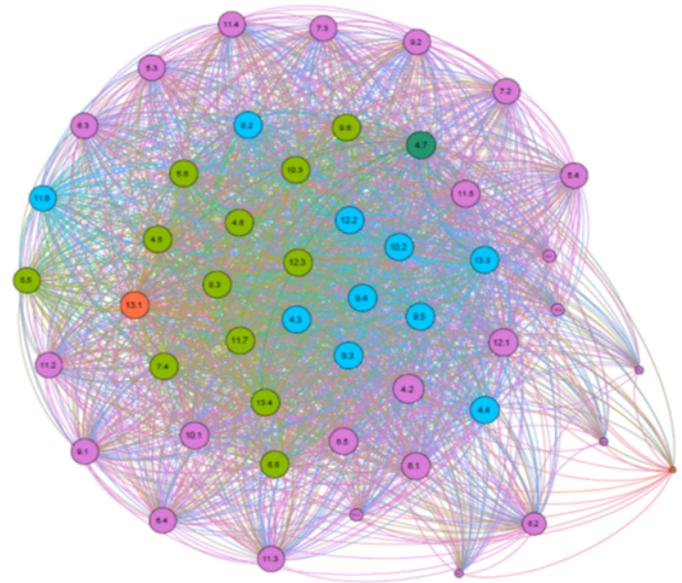


Figura 2 Grafo 49 procesos clasificados por grupo de proceso.

La **Figura 2** muestra las relaciones entre los 49 procesos del PMBOK® según la notación designada en dicho documento. Cada uno de estos está representado por un nodo, mientras que las conexiones entre los procesos se representan por aristas o líneas. El tamaño de cada nodo está relacionado con el grado, es decir, el número de procesos que se conectan a ese proceso en específico. Por lo tanto, el tamaño de cada nodo representa el nivel de conexión que tiene ese proceso en la red.

Al realizar un análisis de filtros con Gephi entre pares de grupos de procesos “Planificación” - “Monitoreo y Control” (Figura 3), se obtiene una densidad de grafo de 0.80 y un Average Degree (grado medio) del 56.00%, mientras que “Planificación - Ejecución” (Figura 4) presenta una densidad de grafo de 0.79 y un Average Degree (grado medio) del 51.90 %. Para ambos casos los resultados no muestran diferencias significativas, manifestando una baja dispersión. Esto además se demuestra en que más de la mitad de los elementos de los grupos de procesos filtrados, presentan una relación bidireccional en las dos situaciones de análisis.

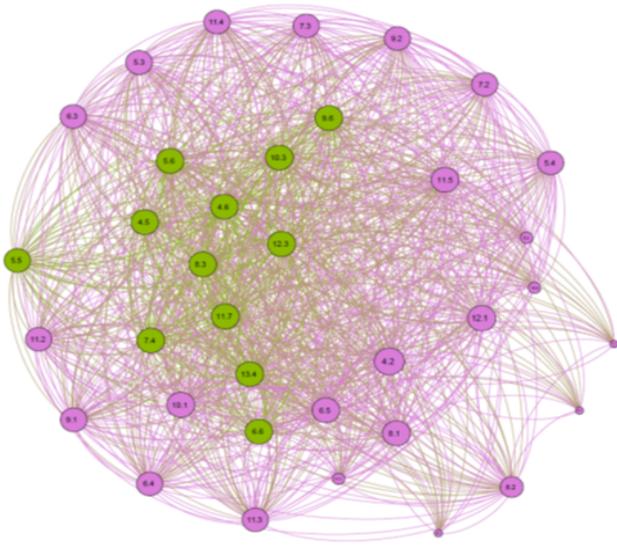


Figura 3 Grafo filtrando grupos de procesos “Planificación (rosa) – Monitoreo y Control (verde)”.

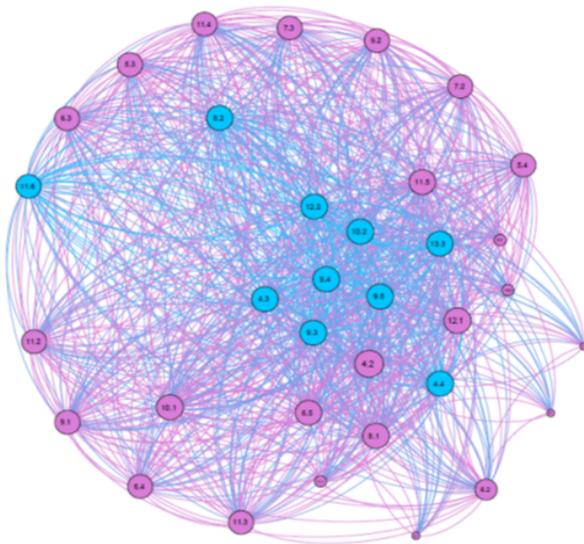


Figura 4 Grafo filtrando grupos de procesos “Planificación (rosa) – Ejecución (celeste)”

En el interior de la red están los grupos de procesos “Ejecución” y “Monitoreo y Control” (Figura 5), que corresponden al 20.41% y 24.49% respectivamente del total de los procesos. Esto refleja que el PMBOK® entrega una excelente metodología y está consciente de la importancia de llevar un correcto control mientras el proyecto está en ejecución y se le debe otorgar una dedicación similar a ambos grupos de procesos, lo cual resultará vital para cumplir los estándares de calidad y aumentar las posibilidades de lograr el éxito del proyecto.

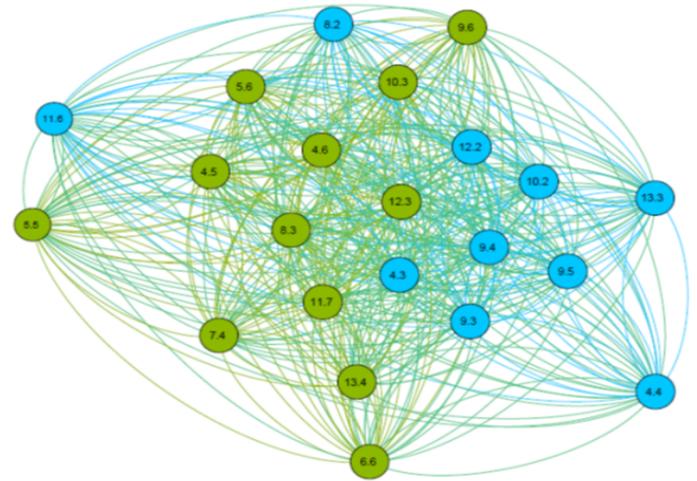


Figura 5 Grafo filtrando grupos de procesos “Ejecución (celeste) – Monitoreo y Control (verde)”.

5. Discusión

En general, se observa que los tamaños de los nodos son bastante homogéneos según su grado, con desviación estándar 5.47, esto demuestra que el PMBOK® los vincula eficazmente y que la mayoría de los procesos juega un papel importante dentro de la gestión del proyecto. Además, entre todos los procesos existe una fuerte relación de mutua dependencia, es decir, una constante retroalimentación. Lo anterior se refleja en el indicador Average Weighted Degree (grado ponderado medio), 78.04%, indicando que, del total de 1,953 conexiones de la red, la mayoría de las interacciones entre procesos son bidireccionales, confirmando el hecho de que la red es altamente recíproca en cuanto a sus vinculaciones entre los procesos.

En el ciclo de vida de un proyecto, la fase de planificación corresponde al 48.98% del total de procesos propuestos por el PMI, por lo que este grupo de procesos sería uno de los puntos fundamentales de un proyecto. Considerando esto, se debiera poner especial atención al momento de su elaboración, para fijar bien lo que se hará y lo que se busca lograr en el futuro. En un proyecto de la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción resulta de suma importancia la especial atención en las salidas de los procesos en etapa de planificación. En la Figura 2 se puede visualizar que los nodos de planificación están alrededor de todo el sistema, encerrando a los otros. Según lo anterior, se puede afirmar que la planificación del proyecto define las condiciones de borde, estableciendo los límites del proyecto, es decir, la planificación delimita un universo donde los demás procesos están inmersos.



Por otro lado, el nodo con más interacciones de entradas resultó ser el proceso “Desarrollar el Plan para la Dirección del Proyecto”, lo cual tiene bastante sentido teniendo en cuenta que 47 de los 49 procesos del PMBOK® tienen a este como entrada, según esto se va retroalimentando y actualizando constantemente. Analizando el indicador Betweenness Centrality (centralidad mutua) para el proceso “Desarrollar el Plan para la Dirección del Proyecto”, se obtiene un valor de 288.00, este número es bastante grande en comparación a los otros procesos, considerando que el segundo valor más grande de la red presenta un Betweenness Centrality (centralidad mutua) de 9.51 perteneciente al proceso de “Planificar la Gestión de las Adquisiciones”, y desde ahí todos los demás valores de este indicador son más bajos. Por lo descrito anteriormente, se puede afirmar que efectivamente el proceso “Desarrollar el Plan para la Dirección del Proyecto” es el núcleo crítico de la red, siendo el proceso puente que otorga la ruta más directa, ofreciendo una conexión con prácticamente todos los demás nodos (47 de un total de 49), aunque entre el nodo que representa el proceso de “Desarrollar el Acta de Constitución del Proyecto” no exista una directa vinculación entre sí.

El nodo con tamaño más reducido (Ver Figura 2), es decir, el proceso con menos interacciones de la red, corresponde al proceso “Desarrollar el Acta de Constitución del Proyecto, este es una entrada de muchos otros procesos, siendo un requisito imprescindible en la fase de inicio, sin embargo, no es una salida de los procesos con los que se vincula. Analizando los grados de entrada de los 49 procesos se obtiene que “Desarrollar el Acta de Constitución del Proyecto” arroja el valor más pequeño de la red que es de 11, es decir, dicho proceso es una salida de solo 11 procesos del PMBOK, luego lo sigue el proceso de “Planificar la Gestión de los Costos” con un valor de grado de entrada 30. Centrándose en estos dos nodos que tienen los menores valores y notando que existe un salto brusco en cuanto a la diferencia de grado de entrada, se puede explicar el por qué “Desarrollar el Acta de Constitución del Proyecto” se aprecia en la red como el más alejado y, notablemente más pequeño en comparación a los demás procesos. Es importante destacar que el proceso con el mayor grado de entrada que es de 47 procesos es “Desarrollar el Plan para la Dirección del Proyecto”, por esto se observa en la red que es el nodo con mayores dimensiones.

Ahora analizando las estadísticas del grafo, se tiene que el diámetro de la red es de 3, es decir, que los nodos más lejanos están a 3 nodos o procesos de distancia, para encontrarse el uno al otro. Esto demuestra que los componentes de la red son muy cercanos entre ellos, con lo cual se deja en evidencia la dependencia mutua y estrecha vinculación entre los 49 procesos del PMBOK®.

Teniendo presente que valores cercanos a 1 quiere decir que estamos en presencia de un gráfico denso y valores cercanos a 0 representan nodos muy separados entre sí, es posible afirmar que los procesos (nodos) de la red poseen poca dispersión y no se identifican huecos o agujeros dentro del sistema, ya que Gephi entrega una densidad del grafo de 0.83.

Otro indicador relevante de estadísticas es la modularidad que resultó ser 0.021, este parámetro intenta evaluar el número de agrupaciones distintas dentro de la red. Notar que la modularidad es baja, debido a que la forma del grafo es uniformemente circular, con elementos muy próximos. Además, analizando el grafo se ve claramente que los grupos de procesos no están empaquetados, sino que están todos integrados entre ellos, unos con otros.

6. Conclusiones

Tras este análisis es posible observar que los tamaños de los nodos en la red son bastante homogéneos según su grado, demostrando que la mayoría de los procesos juegan un papel de importancia similar dentro de la gestión del proyecto. El grupo de procesos de planificación corresponden a prácticamente la mitad del total de procesos propuestos por el PMI, planificar es fundamental ya que define las condiciones de borde, estableciendo los límites del proyecto. El proceso “Desarrollar el Plan para la Dirección del Proyecto” es el núcleo crítico de la red, siendo el proceso puente que otorga la ruta más directa ofreciendo una conexión con prácticamente todos los demás 47 procesos (nodos), a excepción del proceso “Desarrollar el Acta de Constitución del Proyecto”. Se observa una gran dispersión en las salidas de los procesos y una baja dispersión en las entradas, esto es debido que muchas entradas se repiten, pero los productos o salidas de procesos son diferentes y más variables. Existe una muy aceptable trazabilidad entre los 49 procesos lo que es muy favorable para lograr una exitosa gestión de proyectos, sin embargo, según las métricas obtenidas se podría mejorar algunas relaciones entre procesos, potenciando el nivel de integración.

El rol de comunicador de un director de Proyecto es fundamental dentro de la gestión de proyectos, ya que él es el responsable de que efectivamente todos los procesos correspondientes sean aplicados de forma integrada y se plasme in situ lo representado en el grafo de la red de procesos obtenido mediante el Social Network Analysis.



El resultado de esta investigación proporciona información al director de cualquier tipo de proyecto sobre la identificación de los grupos de procesos y/o procesos que requieren prioridad. Es el director quien cumple un rol fundamental dentro de la gestión de proyectos.

Lo expuesto es aplicable a todo el ciclo de vida del proyecto, "Inicio", "Planificación", "Ejecución", "Monitoreo y Control" y "Cierre". Ahora considerando el caso de los proyectos AIC se tiene que la ITO (Inspección Técnica de Obra) es una entidad que puede aplicar directamente lo mencionado en el presente estudio en todas las fases, puesto que trabaja en conjunto al Director de Proyectos, verificando que se cumplan lo descrito en los planos, las bases técnicas, controlando el cronograma, costos, calidad, etc, siendo el representante directo del mandante. El profesional debe tener presente la interacción de los procesos e importancia según métricas obtenidas, por ejemplo, durante la revisión de bases contractuales en el inicio del proyecto, gestionar la comunicación y procedimientos de trabajo durante la planificación, realizar reuniones con contratistas y gestionar la documentación e instructivos durante la ejecución, levantar hallazgos y controlar el programa durante el monitoreo y control y generar informes técnicos de cierre de contratos durante el cierre del proyecto. En definitiva, la guía de las buenas prácticas PMBOK® puede ser aplicada por cualquier profesional que esté involucrado en el rubro de la AIC y ejecute sus labores de gestión ya sea en oficina técnica o terreno.

El método realiza un diagnóstico de la interacción entre los procesos de la guía PMBOK®, dándole valor a las buenas prácticas propuestas por el Project Management Institute. Metodologías de ejecución práctica y optimización de procesos quedan sujetas a investigaciones futuras en el área.

Las diferentes métricas obtenidas podrían ser analizadas más a fondo y ser tomadas como base para futuros trabajos de investigación, con el fin de proponer mejoras sobre la guía,

conlleando a una red más compacta con interacciones óptimas, elevando las probabilidades del éxito en la gestión por los Directores de Proyectos que utilicen el PMBOK® como de guía.

7. Referencias

- [1] Atkinson, R. 1999. Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, it's time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*, 17(6), 337–342.
- [2] Baccarini, D. 1996. The concept of project complexity a review. *International Journal of Project Management*, 14(4), 201–204.
- [3] Cherven, K. 2013. *Network Graph Analysis and Visualization with Gephi*. 1st Ed. PACKT, Birmingham
- [4] Cherven, K. 2015. *Mastering Gephi Network Visualization*. 1st Ed. PACKT, Birmingham
- [5] Hobbs, B., Aubry, M., & Thuillier, D. (2008). The project management office as an organizational innovation, 26, 547–555. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.05.008>
- [6] Kerzner, H. 2006. *Project management: A systems approach to planning, scheduling and controlling* (9th edition). New York.
- [7] Kovács, A. 2004. *Project Management Organizations*. Boston, MA: Springer, Boston, MA. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8947-5_10
- [8] Meredith, J. R., & Mantel, S. J. 2006. *Managerial, Project management: An Approach*. 6th Ed. J. Wiley & Sons Inc, Eds, New York.
- [9] Project Management Institute. 2017. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide.)* 6th Ed. Project Management Institute, Pennsylvania

Los artículos enviados a la revista RIOC deberán ser trabajos originales que no han sido publicados previamente ni estar presentados a otra revista, para ser publicados con acceso abierto. Los artículos pueden ser escritos en inglés o español y deberán ser enviados en versión electrónica en **formato.doc o.docx**. Los artículos deberán ser subidos a través de la página web **www.rioc.cl** para lo cual debe registrarse y generar un envío. Otra opción de envío puede ser a través del correo electrónico **rioc@ufrontera.cl**, indicando el nombre, e-mail, afiliación institucional y grado académico del autor de correspondencia. El artículo será enviado a evaluadores externos especialistas en los temas específicos para su revisión. El Autor de Correspondencia puede sugerir al Editor revisores idóneos de acuerdo al tema del trabajo propuesto. El Editor podrá solicitar revisiones y correcciones antes de tomar una decisión final de aceptación o rechazo del artículo. Además, tenga en cuenta que:

- No hay tarifa de publicación
- Los artículos están disponibles gratuitamente tanto para los suscriptores como para el público en general con reutilización permitida.
- La revista aplica criterios de revisión por pares y estándares de aceptación.

Asegúrese de que los siguientes elementos estén presentes en sus manuscritos:

Un autor ha sido designado como el autor de correspondencia con los datos de contacto:

- Dirección de correo electrónico
- Dirección postal completa

El Manuscrito debe incluir:

- Palabras clave (máximo 4)
- Todas las figuras (incluir títulos relevantes)
- Todas las tablas (incluyendo títulos, descripción, notas al pie)
- A modo de referencia el manuscrito no debiese exceder de 10.000 palabras

Otras consideraciones

- El manuscrito ha sido corregido ortográficamente y se ha verificado la gramática.
- Todas las referencias mencionadas en la Lista de referencias se citan en el texto y viceversa.
- Se revisaron las políticas de la revista detalladas en esta guía y las normas en envío. a

Declaración y verificación

La presentación de un artículo implica que el trabajo descrito no se ha publicado previamente (excepto en forma de resumen o como parte de una conferencia o tesis académica publicada o como preimpresión electrónica), que no está bajo consideración para su publicación en otro lugar, que su publicación es aprobada por todos los autores y tácita o explícitamente por las autoridades responsables donde se realizó el trabajo, y que, si se acepta, no se publicará en otro lugar en la misma forma, en inglés o en cualquier otro idioma, incluido electrónicamente sin el consentimiento por escrito del titular de los derechos de autor.

Cambios en la autoría

Se espera que los autores consideren cuidadosamente la lista y el orden de los autores antes de enviar su manuscrito y proporcionen la lista definitiva de los autores en el momento de la presentación original. Cualquier adición, eliminación o reordenación de los nombres de los autores en la lista de autoría debe hacerse solo antes de que el manuscrito haya sido aceptado y solo si el editor de la revista lo aprueba.

Fuentes de financiamiento

Se le solicita que identifique quién brindó apoyo financiero para la realización de la investigación y / o preparación del artículo y para describir brevemente el papel del (de los) patrocinador (es), en su caso, en el diseño del estudio; en la recopilación, análisis e interpretación de datos; en la redacción del informe; y en la decisión de enviar el artículo para su publicación. Esta condición opcional puede ser incorporada en la sección "Reconocimientos" después de las Conclusiones del trabajo

Presentación

Nuestro sistema de envío en línea lo guía paso a paso a través del proceso de ingresar los detalles de su artículo y cargar sus archivos. Se requieren archivos editables (p. Ej., Word) para componer su artículo para la publicación final. Toda la correspondencia, incluida la notificación de la decisión del Editor y las solicitudes de revisión, se envía por correo electrónico a través de la plataforma de la revista.

NUEVAS PRESENTACIONES

Las presentaciones de trabajos a esta revista y su proceso de revisión se llevan a cabo totalmente en línea. Se recomienda a los autores tener en cuenta los siguientes puntos

Revisión por pares

El editor evaluará inicialmente todas las contribuciones para determinar su idoneidad para la revista. Los documentos que se consideran adecuados se envían normalmente a un mínimo de dos revisores expertos independientes para evaluar la calidad científica/tecnológica del documento. El Editor es responsable de la decisión final con respecto a la aceptación o rechazo de artículos. La decisión del editor es final e inapelable.

Uso de software de procesamiento de textos

Independientemente del formato de archivo del envío original, para una adecuada revisión se nos debe proporcionar un archivo editable de todo el artículo. Mantenga el diseño del texto lo más simple posible. La mayoría de los códigos de formato serán eliminados y reemplazados al procesar el artículo. El texto electrónico debe prepararse de una manera muy similar al formato ejemplo disponible en la WEB) Para evitar errores innecesarios, se recomienda encarecidamente utilizar las funciones de "revisión ortográfica" y "verificación gramatical" de su procesador de texto.

ESTRUCTURA DEL ARTÍCULO

Subdivisión: secciones numeradas

Divida su artículo en secciones numeradas y claramente definidas. Las subsecciones deben numerarse 1.1 (luego 1.1.1, 1.1.2,...), 1.2, etc. (el resumen no está incluido en la numeración de las secciones). Use esta numeración también para las referencias cruzadas internas, es decir no solo se refiera a 'el texto'. Cualquier subsección puede recibir un breve encabezado. Cada título debe aparecer en una línea separada.

Página de título

- **Título.** Conciso e informativo. Los títulos se usan a menudo en sistemas de recuperación de información. Evite abreviaturas y fórmulas cuando sea posible. Evite nombres conocidos solo en un contexto definido.
- **Nombres de los autores y afiliaciones.** Indique claramente el (los) nombre (s) y apellido (s) de cada autor y verifique que todos los nombres estén escritos con precisión. Presente las direcciones de afiliación de los autores (institución u organismo donde se realizó el trabajo real, en tanto aplique) debajo de los nombres. Indique todas las afiliaciones con una letra superíndice minúscula inmediatamente después del nombre del autor y frente a la dirección correspondiente. Proporcione la dirección postal completa de cada afiliación, incluido el nombre del país y, si está disponible, la dirección de correo electrónico de cada autor.
- **Autor de correspondencia.** Indique claramente quién manejará la correspondencia en todas las etapas de arbitraje y publicación, también después de la publicación. Por ejemplo un * a continuación del nombre del autor de correspondencia y una nota posterior que indique "Autor de correspondencia" sería adecuado. Es deseable que el autor por correspondencia sea el responsable de cargar los documentos en la plataforma virtual de la RIOCI. Esto asegura una más fluida comunicación. Asegúrese que el autor de correspondencia proporcione una dirección de correo electrónico y mantenga actualizados los datos de contacto en la plataforma de la RIOCI.

Resumen

Se requiere un resumen conciso y real. El resumen debe indicar brevemente el propósito de la investigación, los resultados principales y las principales conclusiones. Un resumen a menudo se presenta por separado del artículo, por lo que debe ser capaz de ser independiente. Por esta razón, las referencias deben evitarse. Además, se deben evitar las abreviaturas no estándar o poco comunes, pero si son esenciales, deben definirse en su primera mención en el mismo resumen. **Un resumen no debiese exceder de 1800 caracteres (incluido los espacios).** El resumen debe escribirse en un correcto inglés y castellano, siendo el primero el idioma del cuerpo del manuscrito.

Palabras clave

Inmediatamente después del resumen, proporcione un máximo de 4 palabras clave, utilizando la ortografía estadounidense y castellana. Evite los términos generales, plurales y múltiples conceptos (evite, por ejemplo, "y", "de"). Séa respetuoso con las abreviaturas: solo las abreviaciones firmemente establecidas en el campo pueden ser elegibles. Estas palabras clave se usarán con fines de indexación.

Introducción

Indique los objetivos del trabajo y proporcione un trasfondo adecuado, evitando una encuesta bibliográfica detallada o un resumen de los resultados. Debe aportar los antecedentes teóricos que justifican el objetivo del trabajo y especifican el punto de partida del conocimiento respecto del problema u oportunidad que desea abordar.

Teoría

Una nueva sección de carácter teórico debe ampliar no repetir, el fondo del artículo ya tratado en la Introducción y sentar las bases para el trabajo posterior. Una nueva sección de teoría será aplicable ante la necesidad de proporcionar mayores antecedentes que precisen la temática que se abordará.

Materiales y/o métodos o metodología

Proporcione suficientes detalles para permitir que el trabajo sea reproducido por un investigador independiente. Los métodos que ya están publicados deben resumirse e indicarse mediante una referencia. Si cita directamente (literalmente) de un método publicado previamente, use comillas y también cite la fuente. Cualquier modificación a los métodos existentes también debe describirse.

Los Resultados

Los resultados son el producto de haber aplicado los métodos y/o materiales expuestos previamente. La presentación de los resultados debe ser clara y concisa. Evite la explicación detallada del procesamiento de la información. Tenga en cuenta que sus resultados deben ser expuestos en el espacio limitado. Solo en los casos justificados tablas de más de una página serán permitidas.

Discusión

Esto debería explorar la importancia de los resultados del trabajo, no repetirlos. Una sección combinada de Resultados y Discusión a menudo es apropiada. Evite citas extensas y discusiones sobre literatura ya publicada.

Conclusiones

Las principales conclusiones del estudio que dan respuesta a su objetivo pueden presentarse en una breve sección de Conclusiones. Además, asegure se indicar el aporte científico /tecnológico de la investigación (novedad y utilidad del artículo) y futuras líneas de trabajo que podrían derivarse de su aporte.

Reconocimientos

Intercalar los reconocimientos en una sección separada al final del artículo antes de las referencias. Por lo tanto evite incluir agradecimiento o reconocimientos en la página del título, como una nota al pie del título o de otro modo. En esta sección las fuentes de financiamiento pueden ser incorporadas. Para ello emplee el siguiente formato.

Este trabajo fue apoyado por los Institutos Nacionales de Salud [números de concesión xxxx, yyyy]; la Fundación Bill & Melinda Gates, Seattle, WA [número de concesión zzzz]; y los Institutos de Paz de los Estados Unidos [número de concesión aaaa].

Referencias y citaciones

- **Citación en el texto**

Asegúrese de que cada referencia citada en el texto también esté presente en la lista de referencias (y viceversa). Los resultados no publicados y las comunicaciones personales no se recomiendan en la lista de referencias, pero pueden mencionarse en el texto. Si estas referencias se incluyen en la lista de referencia, deben seguir el estilo de referencia estándar de la revista y deben incluir una sustitución de la fecha de publicación por "Resultados no publicados" o "Comunicación personal". La cita de una referencia como 'en prensa' implica que un artículo aún no publicado ha sido aceptado para su publicación.

Todas las citas en el texto deben referirse a:

1. *Autor único*: el nombre del autor (sin iniciales, a menos que exista ambigüedad) y el año de publicación;
2. *Dos autores*: los nombres de ambos autores y el año de publicación;
3. *Tres o más autores*: primer nombre del autor seguido de 'et al.' y el año de publicación.

Las citas pueden incluirse en la narrativa (por ejemplo Kramer et al. (2010) han mostrado recientemente... ') o hacerse entre paréntesis (por ejemplo 'como se demostró (Allan, 2000a, 2000b; Allan y Jones, 1999)).

Por cada citación se recomienda no incluir más de tres citas.

Si se identifican más de una referencia del mismo autor (es) con el mismo año, se deben incluir las letras "a", "b", "c", etc., colocadas después del año de publicación.

• Formato del listado de referencia

En general son aceptadas listas de referencias basadas en la norma APA; sin embargo no hay requisitos estrictos sobre el formato de referencia en la presentación, debiendo ser coherente en todo el manuscrito. De cualquier forma se recomienda evitar los modelos Vancouver u otros que presentan las referencias asociadas a un número correlativo en el cuerpo del manuscrito.

Las listas de referencias deben organizarse primero alfabéticamente y luego ordenarse cronológicamente si es necesario.

Un estilo de referencia adecuado para RIOC es:

Nombre (s) del autor (es) <Apellido, inicial del nombre;...>, año de publicación, título del capítulo / título del artículo, título de la revista / título del libro, número de volumen (número de edición), pág. inicial – pág. final, DOI

Ejemplos:

Referencia a una publicación de revista:

Van der Geer, J.; Hanraads, J.A.; Lupton, R.A., 2010. El arte de escribir un artículo científico. J. Sci. Commun. 163, 51-59.

Referencia que usa DOI para un artículo que aún no está publicado:

VanDecar, J.C.; Russo, R.M.; James, D.E.; Ambeh, W.B.; Franke, M., 2003. Continuación sísmica de la losa de las Antillas Menores bajo el noreste de Venezuela. Journal of Geophysical Research. En prensa. <https://doi.org/10.1029/2001JB000884>

Referencia a un libro:

Strunk Jr., W.; White, E.B. 2000. The Elements of Style, 4ta Ed. Longman, Nueva York.

Referencia a un capítulo en un libro editado:

Mettam, G.R.; Adams, L.B.; 2009. Cómo preparar una versión electrónica de su artículo, en: Jones, BS, Smith, RZ (Eds.), Introducción a la era electrónica. E-Publishing Inc., Nueva York, pp. 281-304.

Referencia a un sitio web:

Cancer Research UK, 1975. Reportes de estadísticas de cáncer para el Reino Unido. Disponible en <http://www.cancerresearchuk.org/aboutcancer/statistics/cancerstatsreport/> (consultado el 13 de marzo de 2003).

Referencia a un conjunto de datos:

[conjunto de datos] Oguro, M.; Imahiro, S.; Saito, S.; Nakashizuka, T., 2015. Datos de mortalidad de la enfermedad del marchitamiento del roble japonés y las composiciones de los bosques circundantes. Mendeley Data, v1. <https://doi.org/10.17632/xwj98nb39r.1>.

ELEMENTOS DEL ARTÍCULO

Abreviaturas

Defina abreviaturas que no son estándar en este campo solo la primera vez que esta sea usada en el cuerpo del documento. Asegure la consistencia de las abreviaturas en todo el artículo.

Fórmulas matemáticas

Envíe ecuaciones matemáticas como texto editable y no como imágenes. Presente fórmulas simples en línea con el texto normal siempre que sea posible y utilice (/) en lugar de una línea horizontal para términos fraccionarios pequeños, por ejemplo, X / Y. En principio, las variables deben presentarse en cursiva. Numerar consecutivamente todas las ecuaciones que deben mostrarse por separado del texto entre paréntesis y asegurar que cada ecuación sea citada en el cuerpo del documento.

Notas al pie

Las notas al pie deben usarse con moderación. Numerarlos consecutivamente a lo largo del artículo. Muchos procesadores de texto crean notas al pie en el texto, y esta característica puede ser utilizada. Si este no fuera el caso, indique la posición de las notas a pie de página en el texto y presente las notas al pie de página por separado al final del artículo.

Figuras y tablas incrustadas en el texto

Asegúrese de que las figuras y las tablas incluidas en el archivo único se coloquen junto al texto relevante en el manuscrito, en lugar de en la parte inferior o superior del archivo. El título correspondiente debe colocarse directamente debajo de la figura o tabla. Cada tabla y figura deberán contar con un número identificador a través del cual debe estar citado en el cuerpo del manuscrito. El orden de presentación de cada figura en el cuerpo del documento debe ser consistente en su aparición; es decir no puede mencionarse la Figura 2 si antes no ha sido mencionada la Figura 1. Esta situación es análoga para la mención de Tablas y Ecuaciones.

Ilustraciones

Las ilustraciones pueden incluir gráficos, dibujos lineales, esquemas, diagramas y fotografías. Deben numerarse en forma secuencial, en el mismo orden en que son referenciadas en el texto como: figura 1, figura 2, etc. El título debe presentarse bajo la figura. Evite emplear ilustraciones optimizadas para el uso de la pantalla (resolución muy baja) y evite gráficos que sean desproporcionadamente grandes para el contenido.

Leyendas de las figuras

Asegúrese de que cada ilustración tenga al menos un título. Una figura debe incluir un título breve (no en la misma figura). Figuras compuestas emplearán letras minúsculas para diferenciarlas (Por ejemplo Figura 3a, Figura 3b...). Cada parte de una figura compuesta debe estar mencionada en el cuerpo del manuscrito. Por su parte, el texto en la ilustración (en el interior de la figura) podrá emplear tamaño mínimo y explicará todos los símbolos y abreviaturas utilizados.

Tablas

Por favor envíe las tablas como texto editable y no como imágenes. Es recomendable que las tablas se adjunten al texto relevante en el artículo. Numere las tablas consecutivamente de acuerdo con su apariencia en el texto y coloque las notas de la tabla debajo del cuerpo de la tabla. Emplea las tablas responsablemente y asegúrese de que los datos presentados en ellas no dupliquen los resultados descritos en otra parte del artículo. Evite el uso de reglas verticales y sombreado en las celdas de la tabla.

Material suplementario

El material suplementario, como aplicaciones, imágenes y conjuntos de datos, se puede publicar con su artículo para mejorarlo. Los artículos suplementarios enviados se publican exactamente tal como se reciben (los archivos Excel o PowerPoint aparecerán como tales en línea). Por favor, envíe su material junto con el artículo y proporcione un título descriptivo y conciso para cada archivo suplementario. Si desea realizar cambios en el material suplementario durante cualquier etapa del proceso, asegúrese de proporcionar un archivo actualizado. Desactive la opción "Control de cambios" en los archivos de Microsoft Office ya que estos aparecerán en la versión publicada.

DESPUES DE LA ACEPTACION

Corrección de pruebas

Los autores correspondientes recibirán un correo electrónico con la presentación borrador de la prueba de impresión de su manuscrito. En un plazo establecido los autores podrán solicitar enmiendas sobre la prueba de impresión. Trascurrido dicho plazo sin pronunciamiento del autor de correspondencia se considera que la prueba es aceptada para su impresión. El autor debe tener en cuenta potenciales errores de edición asociados a la composición tipográfica, la integridad, la corrección del texto, las tablas y figuras.

Es importante asegurarse de que todas las correcciones nos sean enviadas en una sola comunicación. Verifique cuidadosamente antes de responder, ya que no se puede garantizar la inclusión de correcciones posteriores. En esta instancia la revisión es exclusivamente su responsabilidad.



El equipo editorial, tienen la responsabilidad de recibir los artículos y emitir un primer juicio sobre los aspectos formales; además de rechazar un artículo cuando este no cuente con suficiente mérito científico y académico para su publicación o esté fuera de la temática de la Revista.

El Editor envía el artículo a evaluadores externos especializados en el área temática; el cual realiza una evaluación de acuerdo a criterios establecidos por la RIOCA. Cada evaluador externo puede rechazar, aceptar o bien aceptar con observaciones un artículo. En caso de rechazo se fundamenta esta situación, de otro modo artículos aceptados con observaciones son re-enviados al autor de correspondencia con las observaciones para la mejora del manuscrito.

Los evaluadores verifican el cumplimiento de todos los aspectos formales, y la consistencia entre las conclusiones, los métodos y objetivos propuestos. Por política de la RIOCA los evaluadores conocen la identidad de los autores, sin embargo los autores desconocerán a sus evaluadores.

En caso de observaciones el Editor se contacta con el autor de correspondencia para solicitar mejoras en el manuscrito en un plazo determinado. Una vez aprobadas por el comité editorial las modificaciones de un manuscrito, este estará en condiciones de ser aceptado para su publicación.

En caso que el resultado de una revisión sea el rechazo de alguno(s) de los evaluadores el manuscrito es enviado a otro árbitro; si el rechazo es confirmado, el artículo es rechazado definitivamente y se comunica se comunica la decisión al autor de correspondencia.



LABORATORIO MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO INGENIERÍA OBRAS CIVILES
UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA

SERVICIOS DE NUESTRO LABORATORIO

ESTUDIO DE
MECÁNICA DE SUELOS

MUESTREO &
ANÁLISIS DE SUELOS

MUESTREO & ANÁLISIS DE
ÁRIDOS PARA DOSIFICACIÓN DE
HORMIGONES & MORTEROS

TOMA DE MUESTRAS DE
HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

EXTRACCIÓN & ENSAYO DE
TESTIGOS DE HORMIGÓN

ENSAYOS DE RESISTENCIA
MECÁNICA AL HORMIGÓN

ASESORÍAS DE
LABORATORIO

ÁREA MECÁNICA DE SUELOS
ÁREA ÁRIDOS & HORMIGONES

HORARIO DE ATENCIÓN
LUNES A VIERNES 09 A 13 HRS. & 14 A 19 HRS.
AVDA. FRANCISCO SALAZAR 01145 TEMUCO
FONO FAX 45 259 2818 LABMATERIALES@UFRO.CL



rioc.cl