

Vol. 1 - Nº 5, Año 2024

Revista Técnica

# INGENIUM





# UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA

## CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



### **DIRECTORIO DE LA REVISTA**

Juan José Rosales Valda, MSc.  
**Decano de la Facultad de Ingeniería Civil**

José Edgar Campos Serrano, MSc.  
**Director de la Carrera de Ingeniería Civil**

---



# Contenido

Presentación.....	7
Métodos de inteligencia artificial para la imputación de precipitación pluvial de la cuenca río Ravelo.....	9
Construcción, demostración y aplicación de los tres números irracionales más famosos.....	15
Desarrollo urbano en Sucre: análisis a las megaobras para la ciudad de Sucre en el bicentenario de Bolivia desde el punto de vista de la ingeniería civil.....	25
Propagación del incremento de esfuerzos verticales en un suelo agrícola de Tarabuco: esfuerzo de preconsolidación en suelos no saturados.....	43
Determinación del coeficiente de dilatación térmica en concreto hidráulico .....	53
Implementación de hormigón permeable sobre cunetas para la gestión ecológica del agua en Sucre.....	57
Comportamiento del módulo resiliente en suelos tipo a - 2 - 4 y a - 2 - 6 considerando el efecto del contenido de humedad - con aplicación al diseño .....	65
Evaluación probabilística del riesgo de inundaciones bajo escenarios de cambio climático en una cuenca de los Cintis Chuquisaca.....	81
“Evaluación sísmica del concreto de alta resistencia para la optimización preliminar del acero de refuerzo en edificaciones de pórticos regulares según NBDS2023” .....	97
Sociedad Científica de Estudiantes de Ingeniería Civil: promoviendo la excelencia académica y profesional .....	103





# Presentación

Con profunda satisfacción, una vez más, como Decano de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, tengo el agrado de presentar a los lectores, el quinto número de la **“REVISTA INGENIUM”**, la misma que contiene artículos científicos que fueron elaborados por gente profesional del área de Ingeniería Civil, quienes, como en anteriores ocasiones, con mucho interés atendieron a la “Convocatoria”, para hacer conocer por este medio impreso facultativo los artículos inéditos de su autoría, los cuales son de relevante actualidad.

Cabe destacar que el material bibliográfico fue escrito con palabras sencillas, para su fácil comprensión, considerando que la misma suscita mucho interés entre los jóvenes estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil.

Debo destacar y agradecer el esfuerzo y compromiso demostrado por los “autores” hacia la Unidad Facultativa y el amor que tienen por la “investigación científica”, porque no escatimaron tiempo y esfuerzo para presentar sus artículos, los cuales con mucho agrado fueron incluidos en el presente número.

Ha transcurrido un quinquenio desde que se tuvo la brillante idea de dar oportunidad a los “investigadores” de la Facultad, para que puedan hacer conocer sus artículos científicos, los cuales demostraron constancia y perseverancia, porque muchos de ellos fueron consecuentes y año tras año brindaron su aporte intelectual abordando temas distintos que son de notable actualidad, coadyuvando de esta manera a la Facultad en la publicación de tan importante aporte científico, no solo para la Unidad Facultativa, sino para la Universidad Mayor, Real y Pontificia San Francisco Xavier de Chuquisaca que nos cobija en su seno y que el pasado mes de marzo cumplió 400 años de trayectoria institucional.

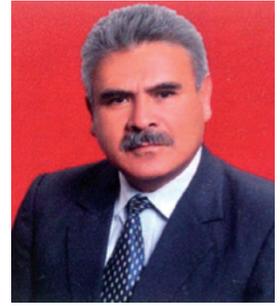
El compromiso asumido cuando se publicó el 1er número de la Revista la gestión 2020 fue cumplido a cabalidad, porque cada gestión se publicó el material bibliográfico, por lo cual doy gracias a Dios, porque permitió este logro de gran significado para mi autoridad, la Facultad y la U.M.R.P.S.F.X.CH.

Como autoridad Facultativa renuevo el compromiso asumido cuando me hice cargo de la conducción de la Unidad Facultativa, que es el de incentivar, fomentar y motivar la investigación científica en la comunidad universitaria de nuestra querida Facultad, con logros tan significativos como el presente en el que se presenta el 5º número de la **“REVISTA INGENIUM”**.

Con la firme convicción personal de que todas las acciones que realizo siempre irán en directo beneficio de la Facultad de Ingeniería Civil, en mi permanente afán de cualificar la misma, para que se destaque en el plano departamental, nacional e internacional, felicito efusivamente a todos los que coadyuvaron de una u otra manera eficientemente para hacer realidad la publicación del 5º número de la **“REVISTA INGENIUM”**, que con el paso de los años se institucionalizó y también hago llegar un prieto abrazo a los “escritores” que presentaron sus eximios trabajos de investigación, para su publicación en el apreciable material bibliográfico que hoy tienes entre tus manos, con la firme idea de que cada artículo que leerás enriquecerá de manera significativa tu intelecto y te permitirá conocer los últimos avances en el campo de la Ingeniería Civil y también con la convicción absoluta que la misma llenará tus expectativas y será de tu plena complacencia.

Msc Ing. Juan José Rosales Valda  
**DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**U.S.F.X.CH.**

# Presentación



En mi condición de Director de Carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, tengo el agrado de presentar a ustedes el quinto número de la Revista "INGENIUM", la cual contiene artículos científicos actualizados relacionados con la apasionante área de "Ingeniería Civil".

El mundo actual caracterizado por su dinámica en constante celeridad en todas las áreas del conocimiento humano plantea múltiples y complejos desafíos. Sin duda que la revista enaltece a la Carrera de Ingeniería Civil, permitiendo crecer académicamente, puesto que los artículos expuestos corresponden a temáticas actuales que se presentan en nuestra profesión.

Es por ello que con honda satisfacción pongo a consideración de los lectores el quinto número de la revista "INGENIUM" resaltando la relevante contribución que representa en el campo de la Ingeniería Civil.

El trabajo comprometido de todos los que conformamos la Facultad de Ingeniería Civil siempre nos permitirá el logro de los objetivos académicos. A tiempo de hacer votos porque la misma se siga publicando año tras año, porque la ciencia no se detiene y tampoco "Ingeniería Civil", les pido que enriquezcan sus conocimientos con la calidad de cada artículo presentado en el material bibliográfico que tienen entre sus manos.

MS.c. Ing. José Edgar Campos Serrano  
**DIRECTOR CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**U.S.F.X.CH.**

# INGENGIUM



# Métodos de inteligencia artificial para la imputación de precipitación pluvial de la cuenca río Ravelo

Campos, J.a, Bellido, J.b Espada, C.c, Huaranca, J.d, Ibarra, A.e

- (a) Docente investigador en el área de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317 N° 573, Campus Universitario Ex REFISUR, Sucre, Bolivia. E-mail: campos.edgar@usfx.bo.
- (b) Docente investigador en el área de Ingeniería de Sistemas de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317 N° 573, Campus Universitario Ex REFISUR, Sucre, Bolivia. E-mail: bellido.boris@usfx.bo.
- (c) Investigadora en el área de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317 N° 573, Campus Universitario Ex REFISUR, Sucre, Bolivia. E-mail: carlyveronica93@gmail.com.
- (d) Estudiante investigadora en el área de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317 N° 573, Campus Universitario Ex REFISUR, Sucre, Bolivia. E-mail: huaranca@gmail.com .
- (e) Estudiante investigador en el área de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317 N° 573, Campus Universitario Ex REFISUR, Sucre, Bolivia. E-mail: sensey.dumb12@gmail.com

Recibido: 10/10/2024 Aceptado: Publicado:

## RESUMEN

En el campo de la hidrología, la Inteligencia Artificial ha tenido una intervención significativa. El objeto es: Evaluar la capacidad de diferentes métodos de inteligencia artificial para la imputación de datos de precipitación en la cuenca del río Ravelo.

Se obtuvieron más de 300.000 datos de precipitación pluvial medidas cada 15 minutos de las gestiones 2019 a las 2023 de la cuenca Río Ravelo en las estaciones de Ravelo, Tumpeka y Cajamarca.

Para determinar las variables usadas se aplicó la correlación de Pearson, obteniendo las variables ambientales para predecir la precipitación pluvial: Presión Barométrica, Humedad relativa, Velocidad del viento y Dirección del viento.

Se definió el conjunto de datos para el entrenamiento, de abril de 2021 a marzo de 2022. Son 140.245 lecturas, Ravelo: 47.331 lecturas, Tumpeka: 46.455 lecturas y Cajamarca: 46.459 lecturas.

Se definió el conjunto de datos de prueba, de mayo 2022 (temporada seca) y diciembre 2022 (temporada de lluvias). Son 17.286 lecturas, Ravelo: 5.762 lecturas, Tumpeka: 5.762 lecturas y Cajamarca: 5.762 lecturas.

Los métodos usados son: Regresión lineal, Árbol de decisión (regresor, clasificador) y Regresión Logística.

Se evidenció que todos los métodos usados son capaces de predecir la precipitación pluvial y por ende pueden ser usados en la imputación de la misma. Se observa que los métodos más convenientes para la imputación son la regresión lineal y el árbol de decisión para clasificación, en vista que, según las métricas obtenidas, tiene el mejor desempeño en la predicción.

**Palabras clave:** Inteligencia Artificial, Regresión lineal, Regresión logística, Árbol de decisión.

## ABSTRACT

In the field of hydrology, AI has had a significant intervention. The object is: To evaluate the capacity of different artificial intelligence algorithms for the imputation of precipitation data in the Ravelo River basin. More than 300,000 rainfall data measured every 15 minutes from 2019 to 2023 were obtained from the Ravelo River basin at the Ravelo, Tumpeka and Cajamarca stations. To determine the variables used, the Pearson correlation was applied, obtaining the environmental variables to predict rainfall: Barometric Pressure, Relative Humidity, Wind Speed and Wind Direction. The data set for training was defined, from April 2021 to March 2022. There are 140245 readings, Ravelo: 47331 readings, Tumpeka: 46455 readings and Cajamarca: 46459 readings. The test data set was defined, from May 2022 (dry season) and December 2022 (rainy season). There are 17,286 readings, Ravelo: 5,762 readings, Tumpeka: 5,762 readings and Cajamarca: 5,762 readings. The methods used are: Linear Regression, Decision Trees (regressor, classifier) and Logistic Regression. It was evident that all the methods used are capable of predicting rainfall and therefore can be used in its imputation. It is observed that the most convenient methods for imputation are linear regression and the decision tree for classification, given that, according to the metrics obtained, it has the best performance in prediction.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Linear regression, Logistic regression, Decision tree.

## INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial (IA) se refiere al campo de estudio que busca desarrollar sistemas y algoritmos capaces de imitar el comportamiento humano, procesamiento de información y toma de decisiones de manera autónoma (Sansom et al., 2020).

En el campo de la hidrología, la IA ha tenido una intervención significativa, utilizando técnicas como el aprendizaje automático, cómo las que se describen a continuación:

### Regresión lineal

Es uno de los modelos más básicos y utilizados en estadística. Se utiliza para analizar la relación entre una variable dependiente (en este caso precipitación) y una o más variables independientes continuas (Montgomery et al., 2019).

La idea principal en la regresión lineal es ajustar una línea recta a los datos de forma tal que minimice la suma de los errores cuadrados entre los valores observados en campo y los valores estimados.

### Árbol de decisión

Es un método de aprendizaje supervisado no paramétrico que se utiliza para clasificación y regresión. El objetivo es crear un modelo que prediga el valor de una variable objetivo aprendiendo reglas de decisión simples inferidas de las características de los datos. Un árbol puede verse como una aproximación constante por partes.

Los árboles de decisión aprenden de los datos a aproximarse a una curva sinusoidal con un conjunto de reglas de decisión si-entonces-si no. Cuanto más profundo sea el árbol, más complejas serán las reglas de decisión y más ajustado será el modelo (Breiman, 2001).

Un árbol de decisión es una estructura jerárquica que se utiliza en aprendizaje automático de datos para tomar decisiones. Puede ser aplicado a la obtención de datos de precipitación futura puesto que en cada nodo del árbol, se realiza una pregunta sobre una característica específica del conjunto de datos, (en este caso, datos de las diferentes variables ambientales) y se toma una decisión basada en la respuesta a esa pregunta. Esta división se repite en nodos subsiguientes hasta llegar a un nodo hoja, donde se toma una decisión final.

### Regresor

Un regresor de árbol de decisión es un tipo de árbol de decisión diseñado específicamente para problemas de

regresión. En lugar de devolver una etiqueta de clase en los nodos hoja, los regresores de árbol de decisión devuelven un valor numérico. Para hacer una predicción, el árbol sigue el camino desde la raíz hasta un nodo hoja y devuelve el valor asociado con ese nodo hoja como la predicción. Este método puede ser aplicado en función al conjunto de variables expuestas en la investigación.

### Clasificador

El clasificador (DecisionTreeClassifier) se basa en el uso de un árbol de decisiones para tomar decisiones de clasificación. En cada nodo del árbol, se realiza una pregunta sobre una característica específica del conjunto de datos, y según la respuesta, se sigue una rama u otra hasta llegar a una hoja que clasifica el dato. El árbol se construye de manera recursiva dividiendo el conjunto de datos en subconjuntos más pequeños en función de las respuestas a las preguntas (Benzerrouk et al., 2013).

Una de las ventajas del método DecisionTreeClassifier es su capacidad para manejar datos con alta dimensionalidad y características no lineales. Además, permite la interpretación del modelo, ya que se puede visualizar el árbol de decisiones resultante, lo que facilita la comprensión de los factores que influyen en la precipitación.

El método DecisionTreeClassifier es una técnica de aprendizaje automático supervisado que se utiliza para la clasificación de datos. En el campo de la hidrología, este método encuentra aplicaciones en la predicción de la precipitación y en la clasificación de eventos de precipitación en diferentes categorías.

### Regresión Logística

Es un método estadístico que permite predecir eventos binarios o categóricos, como la presencia o ausencia de precipitación. Esta técnica se basa en establecer una relación entre la probabilidad de ocurrencia del evento y variables independientes, como la presión atmosférica o la velocidad del viento.

La regresión logística es un método estadístico utilizado para modelar y analizar relaciones entre una variable dependiente binaria (también conocida como variable de respuesta o variable objetivo) y una o más variables independientes.

El uso de la regresión lineal estándar para un resultado de dos niveles puede producir resultados muy insatisfactorios. Es probable que los valores previstos para algunas co-variables estén por encima del nivel superior (normalmente 1) o por debajo del nivel inferior del resultado (normalmente 0). Además, la validez de la regresión lineal depende de que la variabilidad del resultado sea la misma para todos los valores de los predictores. Este supuesto de variabilidad constante no coincide con el comportamiento de un resultado de dos niveles. Por lo

tanto, la regresión lineal no es adecuada para dichos datos y se ha desarrollado la regresión logística para llenar este vacío.

### Estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas miden diferentes variables ambientales las cuales pueden llegar a influir en la precipitación pluvial.

### Variables ambientales

- **Presión Barométrica:**

La presión barométrica es la medida de la presión atmosférica en un lugar específico. El cambio en la presión barométrica puede influir en la formación de nubes y, por lo tanto, en la precipitación. Las áreas de alta presión tienden a inhibir la formación de nubes y reducir la probabilidad de precipitación, mientras que las áreas de baja presión son propicias para la formación de nubes y la precipitación (Ahrens, 2017).

- **Temperatura:**

La temperatura también juega un papel importante en la formación y cantidad de precipitación. Durante el proceso de condensación del vapor de agua, la temperatura puede determinar si se formarán nubes de lluvia o de nieve. Las temperaturas más altas favorecen la formación de nubes de lluvia, mientras que las temperaturas más bajas conducen a la formación de nubes de nieve (Muller, 2017).

- **Humedad relativa:**

La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera en relación con la cantidad máxima de vapor de agua que la atmósfera puede contener a una determinada temperatura. Cuanto mayor sea la humedad relativa, mayor será la probabilidad de que ocurra la precipitación, ya que habrá más vapor de agua disponible para la condensación y formación de nubes (Wallace & Hobbs, 2006).

- **Velocidad del viento:**

La velocidad del viento influye en la precipitación al transportar el vapor de agua a través de la atmósfera. El viento fuerte puede llevar el vapor de agua hacia áreas donde se forman nubes y precipitación, mientras que el viento débil puede impedir la formación de nubes y reducir la probabilidad de precipitación (Anderson, B. M., & Richards, F. J., 2015).

- **Dirección del viento:**

La dirección del viento puede influir en la distribución espacial de la precipitación. Dependiendo de la dirección del viento predominante, las áreas en el

camino del viento pueden recibir más o menos precipitación. Por ejemplo, en las regiones costeras, los vientos que soplan desde el océano pueden llevar aire húmedo y generar precipitación en tierra (Wallace & Hobbs, 2006).

Es importante tener en cuenta que la información proporcionada es general y puede variar dependiendo de las condiciones geográficas y climáticas específicas de cada región.

### Objetivo de la investigación

Evaluar la capacidad de diferentes métodos de inteligencia artificial para la imputación de datos de precipitación en la cuenca del río Ravelo.

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### Obtención de datos:

Para la investigación se solicitó la información necesaria de la empresa ELAPAS (Empresa Local de Agua Potable y Alcantarillado de SUCRE) gracias a solicitudes y los convenios existentes entre la universidad y la empresa, se obtuvo más de 300.000 datos de precipitación pluvial medidas cada 15 minutos de las gestiones 2019 a las 2023 de la cuenca de Ravelo en las estaciones de Ravelo, Tumpeka y Cajamarca.

#### Descripción de las variables obtenidas:

- **TIMESTAMP:** Fecha y hora del registro de la lectura.
- **RECORD:** Número incremental con el número de la lectura.
- **PBar:** Medida de la presión barométrica.
- **PrecipP:** Medición de la precipitación pluvial.
- **DirV:** Dirección de viento.
- **RH:** Humedad relativa.
- **TA:** Temperatura ambiente.
- **VelV:** Velocidad del viento.
- **ET:** Evapotranspiración.
- **R-Rad:** Radiación.
- **Rso:** No se conoce el significado de la variable.
- **Velv\_TMn:** No se conoce el significado de la variable.

#### Eliminar las variables que a simple vista no influyen en la precipitación:

- **RECORD:** El número de lectura no afecta a la precipitación.

- Rso: No se conoce el significado de la variable.
- Velv\_TMn: No se conoce el significado de la variable.

Determinación de las variables que más afectan a la precipitación:

- Cálculo de la correlación de Pearson de todas las variables respecto de la precipitación:
  - RH: 0.110408
  - VelV: 0.035822
  - DirV: 0.009436
  - PBar: 0.005318
  - ET: -0.010428
  - TA: -0.028107
  - R-Rad: -0.043143
- Elección de las variables:
  - RH: 0.110408
  - VelV: 0.035822
  - DirV: 0.009436
  - PBar: 0.005318

La correlación evidencia la relación entre la humedad relativa, la velocidad del viento, la dirección del viento, la presión barométrica y la precipitación, tal como indica la teoría.

Definir el conjunto de datos para el entrenamiento, de abril de 2021 a marzo de 2022. Son 140245 lecturas, con el siguiente detalle:

- Ravelo: 47331 lecturas.
- Tumpeka: 46455 lecturas.
- Cajamarca: 46459 lecturas.

Definir el conjunto de datos de prueba, de mayo 2022 (temporada seca) y diciembre 2022 (temporada de lluvias). Son 17286 lecturas, con el siguiente detalle:

- Ravelo: 5762 lecturas.
- Tumpeka: 5762 lecturas.
- Cajamarca: 5762 lecturas.

Se aplicaron cuatro métodos, dos de regresión y dos de clasificación:

- Métodos de regresión:
  - Aplicación de regresión lineal.
  - Aplicación del árbol de decisión para regresión.
- Métodos de clasificación:
  - Agregar una columna binaria: Cuando la precipitación es diferente a cero, el valor uno, en caso contrario es cero.
  - Aplicación de regresión logística.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Métodos de regresión

#### Aplicación de regresión lineal:

Error cuadrático medio (MSE): 0.050305

Coefficiente de Determinación (R2): 0.000276

#### Aplicación del árbol de decisión para regresión:

Error cuadrático medio (MSE): 0.050463

Coefficiente de Determinación (R2): -0.002852

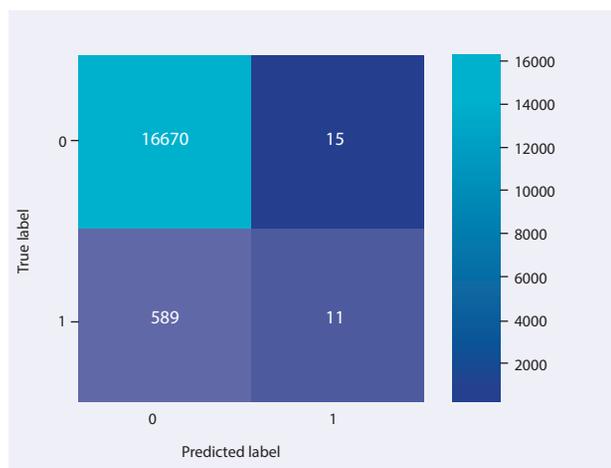
### Métodos de clasificación

#### Aplicación de regresión logística:

Exactitud (Accuracy), a partir de la matriz de confusión de la Figura 1: 0.965056

Figura 1

Matriz de confusión por el método de Regresión Logística



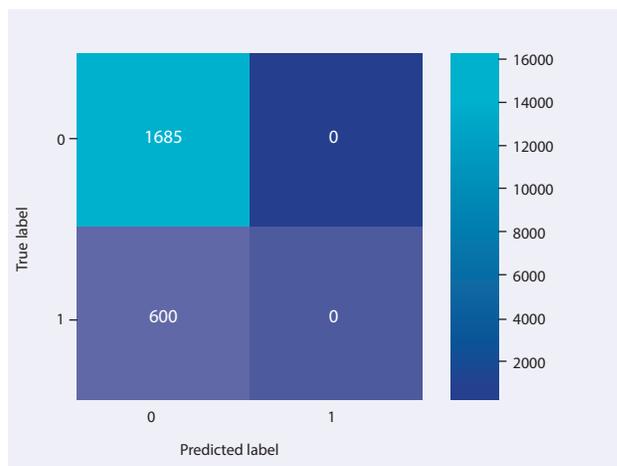
Fuente: Elaboración propia.

#### Aplicación del árbol de decisión para clasificación:

Exactitud (Accuracy), a partir de la matriz de confusión de la Figura 2: 0.965288

**Figura 2**

Matriz de confusión por el método de Árbol de Clasificación



Fuente: Elaboración propia.

Con los métodos de regresión; tales como la regresión lineal y el árbol de decisión para regresión, se calculó el error cuadrático medio (MSE) y el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), se utilizó ambos parámetros como métricas para evaluar su desempeño.

La similitud de exactitud (accuracy) obtenida por los métodos de clasificación identifica la existencia de métodos recomendables para el relleno de datos de la zona específicamente estudiada.

Analizando los resultados obtenidos, se evidenció que todos los métodos usados son capaces de predecir la precipitación pluvial y por ende puede ser usado en la imputación de la misma. Se observa que los métodos más convenientes para la imputación son la regresión lineal y el árbol de decisión para clasificación, en vista que, según las métricas obtenidas, tiene el mejor desempeño en la predicción.

## CONCLUSIONES

Una vez evaluados los métodos, de Inteligencia Artificial, de la regresión lineal, el árbol de decisión y la regresión logística, se puede concluir que todos son capaces de predecir la precipitación pluvial, siendo la regresión lineal y el árbol de decisión los métodos con mejor desempeño en la imputación de datos.

## AGRADECIMIENTOS

Al concluir este proyecto de investigación se agradece a la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca por la enseñanza adquirida, apoyo y motivación por la investigación científica; de igual forma se agradece a la Empresa Local de Agua Potable y Alcantarillado de Sucre (ELAPAS), por la información brindada para la realización y culminación de este proyecto de investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahrens, C. D. (2017). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. Cengage Learning.
- Anderson, B. M., & Richards, F. J. (2015). *Introduction to Physical Meteorology*. Academic Press.
- Benzerrouk, H., Nebylov, A., & Salhi, H. (2013). Contribution in Information Signal Processing for Solving State Space Nonlinear Estimation Problems. *Journal of Signal and Information Processing*, 04(04), 375-384.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
- Carleton, A. M., & Henson, R. (2013). *Decoding the Weather Machine*. W. W. Norton & Company.
- Liou, K. N. (2016). *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (s. f.). (2019). *Introduction to Linear Regression Analysis*.
- Muller, R. A., & Thuraiajah, B. (2017). *Fundamentals of Weather and Climate*. Oxford University Press.
- Perez-Paramo, Y. X., Watson, C. J., Chen, G., Thomas, C. E., Adams-Haduch, J., Wang, R., ... & Lazarus, P. (2023). Impact of genetic variants in the nicotine metabolism pathway on nicotine metabolite levels in smokers. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 32(1), 54.
- Prabhakar, G., Raizada, A., & Vishwakarma, B. D. (2019). *Evapotranspiration: A Comprehensive Reference (Vol. 6)*. Springer Nature.
- Sansom, B. J., Bennett, S. J., Atkinson, J. F., & Vaughn, C. C. (2020). Emergent Hydrodynamics and Skimming Flow Over Mussel Covered Beds in Rivers. *Water Resources Research*, 56(8).
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Elsevier Academic Press.

# INGENIUM



# Construcción, demostración y aplicación de los tres números irracionales más famosos

Mamani Huanca H.a

- a. Licenciado en Matemáticas (U.A.T.F), Docente de la Facultad de Ingeniería Civil (U.S.F.X.) del área de matemáticas, Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: mamani.humberto@usfx.bo

Recibido: Aceptado: Publicado:

## RESUMEN

En este trabajo se estudia cuidadosamente tres aspectos fundamentales que hacen del mismo un contenido y desarrollo exquisito. Inicialmente en lo que refiere a la construcción geométrica y/o numérica de cada uno los tres números irracionales escogidos, se toma criterios plenamente establecidos y probados con anterioridad, como también métodos propios del autor. Luego, en lo referente a la demostración sobre la irracionalidad de los tres números, se toma en cuenta resultados previos para ser aplicados en la demostración principal, todo el procedimiento se basa en métodos que desarrolla el autor basado principalmente en el campo del Análisis Matemático. Como tercer aspecto es la aplicación práctica de los tres números irracionales famosos; estas aplicaciones se presentan en la misma Matemática, en la ingeniería, la Física, Biología, Estadística y demás disciplinas del conocimiento. En cada uno de los aspectos -construcción, demostración y aplicación- se presenta una resolución y explicación clara en su planteamiento resolutorio y tomando como base la representación gráfica para una mayor objetividad del procedimiento matemático.

**Palabras clave:** Número irracional, número Pi, número de Euler, número áureo.

---

## ABSTRACT

In this work, three fundamental aspects that make it an exquisite content and development are carefully studied. Initially, with regard to the geometric and/or numerical construction of each of the three irrational numbers chosen, fully established and previously tested criteria are used, as well as the author's own methods. Then, with regard to the demonstration of the irrationality of the three numbers, previous results are taken into account to be applied in the main demonstration, the whole procedure is based on methods developed by the author based mainly on the field of Mathematical Analysis. As a third aspect is the practical application of the three famous irrational numbers; these applications are presented in Mathematics itself, in Engineering, Physics, Biology, Statistics and other disciplines of knowledge. In each of the aspects -construction, demonstration and application- a clear resolution and explanation is presented in its resolutive approach and based on the graphic representation for a greater objectivity of the mathematical procedure.

**Key words:** Irrational number, Pi number, Euler number, golden ratio.

## INTRODUCCIÓN

Se sabe que un número se denomina irracional cuando no es posible escribirlo como un racional, es decir, como una fracción de números enteros

$$p/q, q \neq 0 \quad (1)$$

También se dice que todo número irracional es todo número real con su parte decimal no exacta, ni periódica.

Ejemplo:

$$\pi = 3.14159265358979... \\ \text{Número Pi}$$

$$e = 2.71828182845904... \\ \text{Número de Euler}$$

$$\varphi = 1.61803398874989... \\ \text{Número áureo}$$

$$\sqrt{2} = 1.41421356237309... \\ \text{Raíz de 2}$$

$$\log 3 = 0.47712125471966... \\ \text{Logaritmo decimal de 3. Etc.}$$

Se considera del ejemplo anterior a tres primeros números irracionales notables de la Ciencia Matemática en lo que refiere a la Teoría de Números, a saber, el renombrado número Pi ( $\pi$ ), el importante número de Euler ( $e$ ) y el enigmático número Áureo ( $\varphi$ ), es desde ya un importante inicio para adentrarse en el mundo de los números y estudiarlos a partir de su construcción, prueba de su irracionalidad y finalmente mostrar sus múltiples aplicaciones prácticas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se centra principalmente sobre el estudio de los números irracionales, para lo cual se escogió al número Pi, el número de Euler y el áureo, que brindan una riqueza matemática muy interesante y desafiante a la vez. Los métodos utilizados por el autor son constructivos, deductivos, inductivos y analíticos propios de la Ciencia Matemática y acompañados de esquemas gráficos que brindan una mayor objetividad a los aspectos planteados al inicio.

## NÚMERO PI - $\pi$

Tabla 1. Ficha técnica de  $\pi$

<b>Nombre:</b>	$\pi$ proviene de las palabras griegas "periferia" y "perímetro" de un círculo.
<b>Origen:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2000 a.C. los babilonios tuvieron ya la relación.</li> <li>225 a.C. Arquímedes, inició su teoría matemática.</li> <li>1706, William Jones, usó su símbolo por primera vez.</li> <li>1737, Leonhard Euler, la popularizó.</li> </ul>
<b>Valor aprox.:</b>	$\pi = 3.14159265358979...$
<b>Uso:</b>	Muy frecuente en Matemáticas, Física e Ingeniería.

## CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE PI ( $\pi$ )

- Empezar con un cuadrado de lado " $l$ ", se traza una circunferencia de radio = 1 y diámetro = 2.

Por el Teorema de Pitágoras:

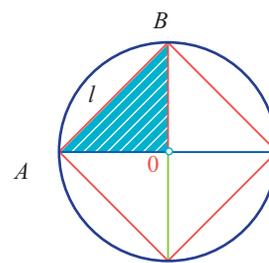
$$l^2 = 1^2 + 1^2 \rightarrow l = \sqrt{2}$$

Perímetro,

$$p = 4\sqrt{2}$$

Calculando Pi:

Figura 1: Cuadrado inscrito



$$\pi = \frac{p}{d} = \frac{4\sqrt{2}}{2} \approx 2.828427... \quad (2)$$

- Octágono de lado " $l$ ", determinando su longitud:

$$l = \overline{AB}$$

$$\overline{OA} = 1$$

$$\overline{BP} = 1 - \overline{OP} = 1 - \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{2 - \sqrt{2}}{2}$$

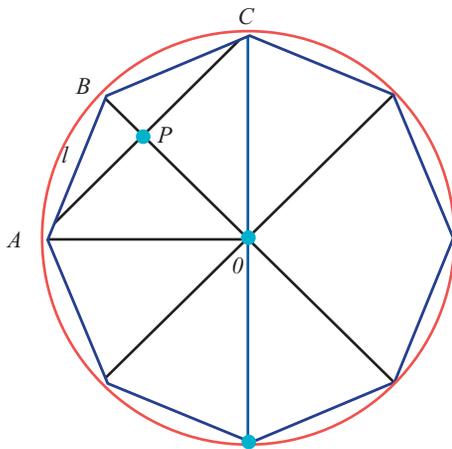
$$\overline{AP} = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \text{y} \quad \overline{OP} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

Por el Teorema de Pitágoras en  $\triangle ABP$ :

$$l^2 = \overline{BP}^2 + \overline{AP}^2$$

$$l = \sqrt{\left[\frac{2-\sqrt{2}}{2}\right]^2 + \left[\frac{\sqrt{2}}{2}\right]^2} = \sqrt{2-\sqrt{2}}$$

**Figura 2:** Octágono inscrito



Perímetro,

$$p = 8\sqrt{2-\sqrt{2}}$$

Calculando Pi:

$$\pi = \frac{p}{d} = \frac{8\sqrt{2-\sqrt{2}}}{2} \approx 3.061467... \quad (3)$$

3. Hexadecágono de lado "l", determinando su longitud:

$$\overline{OA} = 1$$

$$\overline{AC} = \sqrt{2-\sqrt{2}}; \quad \overline{AP} = \frac{\sqrt{2-\sqrt{2}}}{2}$$

$$\overline{BP} = 1 + \overline{OP}$$

Para  $\overline{OP}$ , se aplica el Teorema de Pitágoras en  $\triangle OAP$ :

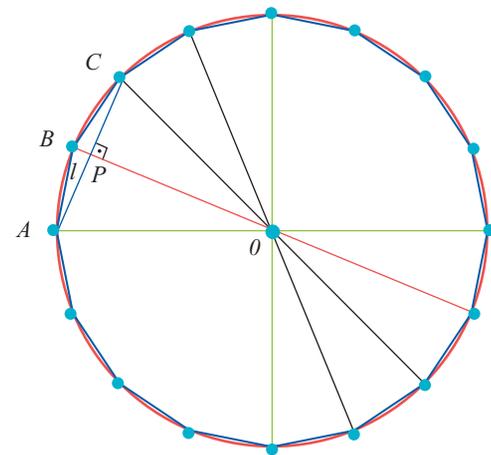
$$\overline{OA}^2 = \overline{AP}^2 + \overline{OP}^2$$

$$\overline{OP} = \sqrt{\overline{OA}^2 - \overline{AP}^2} = \sqrt{1^2 - \left[\frac{\sqrt{2-\sqrt{2}}}{2}\right]^2}$$

$$\overline{OP} = \frac{\sqrt{2+\sqrt{2}}}{2} \rightarrow \overline{BP} = 1 + \overline{OP}$$

$$\overline{BP} = 1 + \frac{\sqrt{2+\sqrt{2}}}{2} = \frac{2 + \sqrt{2+\sqrt{2}}}{2}$$

Determinando  $l = \overline{AB}$ , en el  $\triangle OPB$ :



**Figura 3:** Hexadecágono inscrito

$$l^2 = \overline{AB}^2 = \overline{AP}^2 + \overline{PB}^2$$

$$l = \sqrt{\left[\frac{\sqrt{2-\sqrt{2}}}{2}\right]^2 + \left[\frac{2 + \sqrt{2+\sqrt{2}}}{2}\right]^2}$$

$$l = \sqrt{2 - \sqrt{2} + \sqrt{2}}$$

Calculando Pi:

$$\pi = \frac{p}{d} = \frac{16\sqrt{2 - \sqrt{2} + \sqrt{2}}}{2} \approx 3.121445... \quad (4)$$

De manera general y modificando el número de lados del polígono se tiene la tabla:

**Tabla 2.** Aproximación del valor de Pi.

$l$	$l \text{ mod.}$	Medida de $l$	Valor aproximado
4	$2^0 \times 4$	$\sqrt{2}$	$\pi \approx 2.828427\dots$
8	$2^1 \times 4$	$\sqrt{2 - \sqrt{2}}$	$\pi \approx 3.061467\dots$
16	$2^2 \times 4$	$\sqrt{2 - \sqrt{2 + \sqrt{2}}}$	$\pi \approx 3.121445\dots$
32	$2^3 \times 4$	$\sqrt{2 - \sqrt{2 + \sqrt{2 + \sqrt{2}}}}$	$\pi \approx 3.136548\dots$
64	$2^4 \times 4$	$\sqrt{2 - \sqrt{2 + \sqrt{2 + \sqrt{2 + \sqrt{2}}}}}$	$\pi \approx 3.140331\dots$
$nl=2^n$	$2^n \times 4$	$\sqrt{2 - \sqrt{2 + \sqrt{2 + \sqrt{2 + \dots + \sqrt{2}}}}}$	$\pi \approx 3.14159265\dots$

**DEMOSTRACIÓN DE LA IRRACIONALIDAD DE PI ( $\pi$ )**

Previo a la demostración de la irracionalidad de  $\pi$ , se enuncian los siguientes resultados para aplicarlos por el método de fracciones continuas.

**LEMA 1.** Se considera la fracción continua generalizada,

$$y = \frac{a_1}{b_1 + \frac{a_2}{b_2 + \frac{a_3}{b_3 + \frac{a_4}{b_4 + \dots}}}} \quad (5)$$

Donde  $a_k$  y  $b_k$  son número enteros no nulos para todo  $k \in \mathbb{C}$ . Si para cada  $k$  se tiene que  $|a_k| < |b_k|$  a partir de un cierto valor de  $k$ , entonces  $y$  es irracional.

**LEMA 2.** Si  $x$  es un número racional, entonces  $\tan(x)$  puede expresarse en forma de fracción continua de la siguiente manera:

$$\tan(x) = \frac{x}{1 - \frac{x^2}{3 - \frac{x^2}{5 - \frac{x^2}{7 - \frac{x^2}{9 - \frac{x^2}{11 \dots}}}}} \quad (6)$$

**OBSERVACIÓN.** Se tiene el hecho; como  $\tan\left[\frac{\pi}{4}\right] = 1$ , se deduce que  $\pi$  no puede ser racional, pues si lo fuera, también lo sería  $\left[\frac{\pi}{4}\right]$  y, por el Teorema que se enunciará, su tangente debería ser irracional, y como 1 no es irracional, se llega a una contradicción.

**TEOREMA DE LAMBERT.** Si  $x \neq 0$  es un número irracional, entonces  $\tan(x)$  es irracional.

Demostración:

Sea  $x = \frac{p}{q}$  un número racional distinto de cero. Por el Lema 2, se tiene:

$$\tan\left[\frac{p}{q}\right] = \frac{p}{q - \frac{p^2}{3q - \frac{p^2}{5q - \frac{p^2}{7q - \frac{p^2}{9q - \frac{p^2}{11q \dots}}}}}} \quad (7)$$

Aplicando el Lema 1, se escribe en su notación,

$$a_1 = p, \quad a_k = -p^2 \text{ para } k \geq 2$$

$$b_k = (2k - 1)q \text{ para } k \geq 1$$

Como  $b_k \rightarrow \infty, k \rightarrow \infty$ , y  $a_k$  es constante, es claro que a partir de cierto valor de  $k$  se tendrá que,  $|a_k| < |b_k|$

y, por tanto, se concluye que  $\tan\left[\frac{p}{q}\right]$  es irracional.

Aplicando la Observación, se concluye que  $\frac{\pi}{4}$  es irracional, lo que confirma que  $\pi$  es irracional.

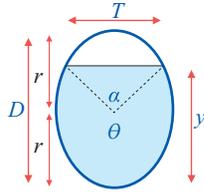
**APLICACIÓN DE PI ( $\pi$ )**

El número  $\pi$  es el número irracional más importante de la Geometría, también se encuentra en una variedad de representaciones objetivas de la ingeniería, ya sea en sus fórmulas que describen propiedades y procedimientos propios de este campo:

- Constante esencial para garantizar la precisión del cálculo de una circunferencia de las tuberías.

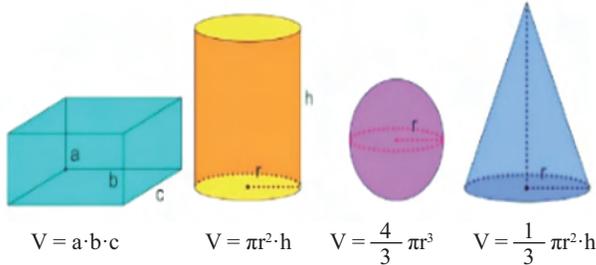
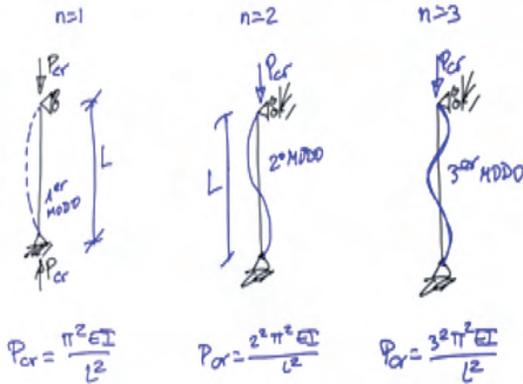
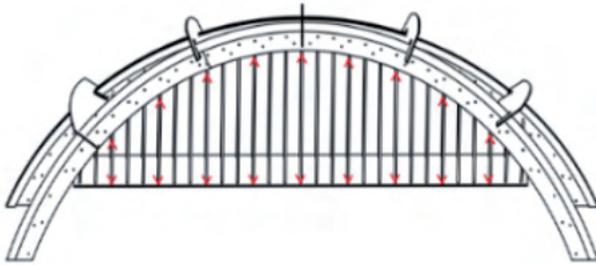
- Pandeo de columnas en una estructura.
- La curvatura de los cables de un puente.
- Estimar el volumen de estructuras cilíndricas o pilotes.

Deducción de las características geométricas de una sección circular Parcialmente llena



$$T = D \sin \frac{\theta}{2} \quad y = \frac{D}{2} \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad \theta = 2 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2y}{D} \right)$$

$$\text{Perímetro} = \frac{\theta \cdot D}{2} \quad \text{Área Total} = \frac{D^2}{8} (\theta - \sin \theta)$$



**Figura 4:** Aplicaciones prácticas y geométricas del número Pi

### NÚMERO DE EULER - e

**Tabla 3.** Ficha técnica de e

Nombre:	e en honor al matemático Leonhard Euler (1707 – 1783).
Origen:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1614, John Napier introdujo el concepto de logaritmos, sentando las bases para el surgimiento del número e.</li> <li>• El verdadero protagonista de esta historia fue el Leonhard Euler, quien buscaba calcular el interés compuesto de una manera precisa.</li> </ul>
Valor aprox.:	e = 2.71828182845904...
Uso:	Como base de las funciones exponenciales y logarítmicas y se utiliza en muchas áreas de matemáticas, ciencias e ingeniería.

### CONSTRUCCIÓN DEL NÚMERO DE EULER (e)

Se basa en el siguiente problema que refiere a interés compuesto. "Una persona pide prestado Bs. 1 a su amigo, con la condición del 100% de interés anual, al final del año el amigo tiene Bs. 2. Nuevamente esta persona pide al amigo un nuevo préstamo, pero con la condición de los 50% de interés pagaderos en dos cuotas semestrales, al final del año el amigo tiene Bs. 2.25. Así, se sigue haciendo el préstamo trimestral, cuatrimestral, mensual. ¿Hacia qué cantidad se aproxima el monto total después de realizar este procedimiento?"

Se desarrolla lo siguiente:

- 100% interés anual:

$$\left[ 1 + \frac{1}{1} \right]^1 = 2$$

- 50% interés semestral:

$$\left[ 1 + \frac{1}{2} \right]^2 = 2.25$$

- $\frac{100}{3}$ % interés cuatrimestral:

$$\left[ 1 + \frac{1}{3} \right]^3 \approx 2.3704...$$

- $\frac{100}{4}$ % interés cuatrimestral:

$$\left[ 1 + \frac{1}{4} \right]^4 \approx 2.4414...$$

- $\frac{100}{12}$  % interés mensual:

$$\left[1 + \frac{1}{12}\right]^{12} \approx 2.6130\dots$$

- $\frac{100}{365}$  % interés diario:

$$\left[1 + \frac{1}{365}\right]^{365} \approx 2.7145\dots$$

- $\frac{100}{8760}$  % interés por hora:

$$\left[1 + \frac{1}{8760}\right]^{8760} \approx 2.7181\dots$$

De manera general:

- $\frac{100}{n}$  % interés para  $n$ ?:

$$\left[1 + \frac{1}{n}\right]^n \approx 2.7182818284\dots$$

Aplicando límites:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[1 + \frac{1}{n}\right]^n = e \quad (8)$$

Respondiendo a la pregunta del problema: la cantidad total se aproxima al número de Euler.

### DEMOSTRACIÓN DE LA IRRACIONALIDAD DE ( $e$ )

Suponga que  $e$  sea racional:

$$\frac{p}{q} = e, \quad p \wedge q \in \mathbb{Z}, q \neq 0$$

$$\frac{p}{q} = e = \frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \dots + \frac{1}{q!} + \frac{1}{(q+1)!} + \dots$$

$$\frac{p}{q} = \left[ \frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \dots \right] + \left[ \frac{1}{q!} + \frac{1}{(q+1)!} + \dots \right]$$

$$q! \left[ \frac{p}{q} = \left[ \frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \dots \right] + \left[ \frac{1}{q!} + \frac{1}{(q+1)!} + \dots \right] \right]$$

$$p(q^{-1})! = \left[ q! + q! + \frac{q!}{2!} + \dots + 1 \right] + \left[ \frac{1}{q+1} + \frac{1}{(q+2)(q+1)} + \dots \right]$$

Se observa que  $p(q^{-1})! \in \mathbb{N}$ , lo que implica que la suma del miembro de la derecha debe ser natural, el primer paréntesis es evidente que es natural, se debe probar que el segundo lo es.

Sea:

$$\frac{1}{q+1} + \frac{1}{(q+2)(q+1)} + \dots < \frac{1}{q+1} + \frac{1}{(q+1)^2} + \frac{1}{(q+1)^3} + \dots$$

Aplicando la fórmula de una progresión geométrica al lado derecho:

$$\frac{1}{q+1} + \frac{1}{(q+1)^2} + \frac{1}{(q+1)^3} + \dots = \frac{\frac{1}{q+1}}{1 - \frac{1}{q+1}} = \frac{\frac{1}{q+1}}{\frac{q}{q+1}} = \frac{1}{q}$$

Entonces se tiene que:

$$\frac{1}{q+1} + \frac{1}{(q+2)(q+1)} + \dots < \frac{1}{q}, \quad \text{falso, no existe un número natural más pequeño que 1.}$$

Así,  $\frac{1}{q+1} + \frac{1}{(q+2)(q+1)} + \dots$  no es un número natural, lo que contradice que

$$p(q^{-1})! \in \mathbb{N}.$$

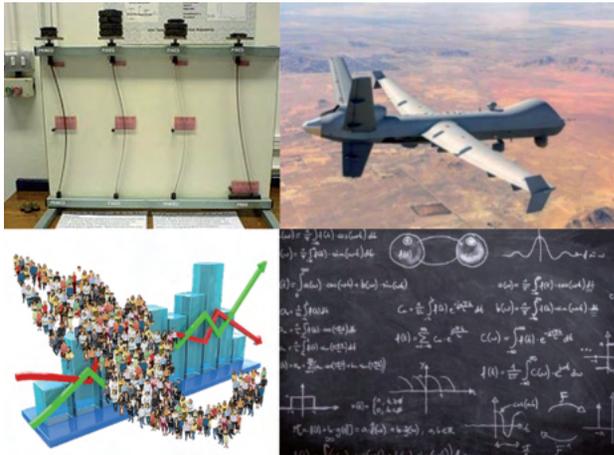
Por tanto:  $\frac{p}{q} = e$  no puede ser racional,  $e$  es un número irracional.

### APLICACIONES DEL NÚMERO DE EULER ( $e$ )

El número  $e$  es el número más importante del Cálculo, por tanto sus aplicaciones son múltiples:

- En Ing. Civil, en el cálculo estructural: Ayuda a diseñar estructuras para evitar el pandeo y a escoger los materiales adecuados.
- En Ing. Aeronáutica: Ayuda a calcular la estabilidad y el rendimiento de aviones no tripulados y aeroplanos.
- En la Biología: se aplica para describir el crecimiento exponencial poblacional bajo condiciones óptimas.

- En la Matemática y la Física: Su utilización es múltiple.



**Figura 5:** Aplicaciones del número de Euler

**NÚMERO DE ÁUREO - φ**

**Tabla 4.** Ficha técnica de φ

Nombre:	φ llamado número de oro, número de Dios, el número de Fibonacci, etc. En honor al escultor griego Fidias.
Origen:	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Descubierto por los griegos, ellos le dieron un tratamiento básicamente geométrico.</li> <li>· Euclides en su obra Elementos uno de los primeros que se refirió a este concepto.</li> </ul>
Valor aprox.:	φ = 1.61803398874989...
Uso:	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Se encuentra en las proporciones que guardan edificios, esculturas, objetos, partes de nuestro cuerpo, caracoles.</li> <li>· En las Matemáticas como fuente de inspiración en la pintura, arquitectura, escultura, ingeniería, diseño gráfico, música, etc.</li> </ul>

**CONSTRUCCIÓN ALGEBRAICA Y GEOMÉTRICA DEL NÚMERO ÁUREO (φ)**

Se considera el gráfico:



**Figura 6:** Proporción para determinar el número áureo

Si la proporción está en la relación:

$$\frac{x}{1} = \frac{x+1}{x}$$

$$x^2 - x - 1 = 0$$

Resolviendo la ecuación:

$$x_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad y \quad x_2 = \frac{1 - \sqrt{5}}{2}$$

Se descarta  $x_2$  por ser negativo. Entonces:

$$x_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = \varphi = 1.61803398874989... \quad (9)$$

Otra forma de aproximarse al número áureo es por medio de la sucesión de Fibonacci, que establece que cada número es la suma de los dos anteriores:

**Tabla 5:** Sucesión de Fibonacci

$F(0) = 0$
$F(1) = 1$
$F(2) = F(2 - 1) + F(2 - 2) = 1$
$F(3) = F(3 - 1) + F(3 - 2) = 2$
$F(4) = F(4 - 1) + F(4 - 2) = 3$
$F(5) = F(5 - 1) + F(5 - 2) = 5$
$... F(n) = F(n - 1) + F(n - 2)$

A medida que se avanza en la sucesión de la tabla anterior, la razón entre dos números consecutivos

$$\frac{F(n+1)}{F(n)} \text{ se aproxima a } \varphi. \text{ Véase:}$$

**Tabla 6:** Aproximaciones de j

$$\frac{1}{1} = 1$$

$$\frac{2}{1} = 2$$

$$\frac{3}{2} = 1.5$$

$$\frac{5}{3} \approx 1.666666666...$$

$$\frac{8}{5} = 1.6$$

$$\frac{13}{8} = 1.625$$

$$\frac{21}{13} \gg 1.61538461\dots$$

$$\frac{233}{144} \gg 1.61805555\dots$$

$$\frac{F(n+1)}{F(n)} \gg j$$

Geoméricamente se muestra:

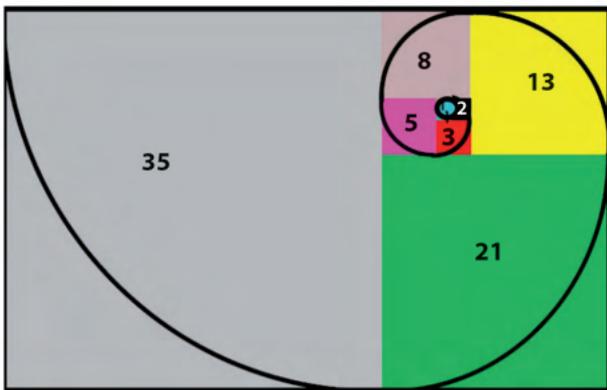


Figura 7: Proporción áurea

### DEMOSTRACIÓN DE LA IRRACIONALIDAD DE (j)

Previa a la demostración se presenta dos resultados importantes.

**TEOREMA 1.** Si  $p$  es primo, entonces  $\sqrt{p}$  es irracional.

**TEOREMA 2.** Sean  $x \hat{=} \alpha$ ,  $y \hat{=} \alpha'$  (conjunto de los números irracionales), entonces se cumple:

a)  $x + y \hat{=} \alpha'$ .

b)  $x \times y \hat{=} \alpha'$ .

Demostración:

De la construcción del número áureo se tiene:

$$j = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$

Se probará  $j$  que sea irracional. Por el Teorema 1, 5 es primo, entonces  $\sqrt{5}$  es irracional.

Por el Teorema 2 a), 1 es racional, entonces  $1 + \sqrt{5}$  es irracional.

Por aplicación del Teorema 2 b),  $\frac{1}{2}$  es racional, entonces  $\frac{1}{2}(1 + \sqrt{5})$  es irracional.

### APLICACIONES DEL NÚMERO ÁUREO (j)

Las aplicaciones del número  $j$  son muchas, se muestran algunos:

- En las construcciones antiguas.
- En la ingeniería, escaleras de caracol.
- En la naturaleza.
- En obras de arte.



Figura 8: Representaciones objetivas del número áureo

### RESULTADOS

Se alcanza la visualización práctica de los tres números irracionales en su construcción, demostración y aplicaciones varias.

- El número  $p = 3.14159265358979\dots$  se construye geoméricamente con bastante precisión, la demostración se basa en dos Lemas y el Teorema de Lambert utilizando las fracciones continuas. Finalmente, las aplicaciones se encuentran en las matemáticas, física y en todo campo de la ingeniería.
- El número  $e = 2.71828182845904\dots$  se lo construye en función a un problema de interés compuesto con una gran aproximación, la demostración se lo realiza en función a dos resultados importantes, el primero calculando un límite indeterminado, luego por la fórmula de progresión geométrica. Se ve una gran cantidad de aplicaciones ya que el número de Euler es muy utilizado en Cálculo y éste es transversal en el campo de las ciencias e ingeniería.

- El número áureo  $j = 1.61803398874989\dots$  se lo construye algebraicamente resolviendo una ecuación de segundo grado, luego por la sucesión de Fibonacci que construye la proporción áurea, la demostración utiliza dos teoremas previos para que  $j$  sea irracional. Ya sea en el arte, las ciencias, la ingeniería, la arquitectura, etc., brindan una notable cantidad de aplicaciones.

### CONCLUSIONES

El estudio de estos tres números irracionales notables  $\mathcal{P}$ ,  $e$  y  $j$ , brinda a los matemáticos y no matemáticos una belleza en su construcción, sobriedad científica en su demostración y objetividad de alto impacto en sus aplicaciones, tanto en matemáticas como en otras disciplinas.

Se hace notar que existen una infinidad de números irracionales que merecen un estudio similar a los mencionados ya que la Ciencia Matemática y el multiverso se encuentra representado por este tipo de números.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dieudonné, J. (1960). Fundamentos de Análisis Moderno. Reverté.
- Enciclopedia Lexus. (2003). La Biblia de las Matemáticas. Letrarte S. A.
- Leveque, W. (1965). Elementary Theory of Numbers. Addison-Wesley Publishing Company.
- Pino, O., Phillips, M. (2018). Calculus Amabilis. Edición Especial. HAT.
- Relos, S. (2007). Cálculo I. 6ta. Edición. Serrano.
- Spivak, M. (1996). Calculus – Cálculo Infinitesimal. Reverté.
- Valente, S. (1998). Diccionario de Matemáticas. 4ta. Edición. Addison Wesley Longman.

# INGENIUM



# Desarrollo Urbano en Sucre: Análisis a las Megaobras para la Ciudad de Sucre en el Bicentenario de Bolivia desde el punto de vista de la Ingeniería Civil

Arancibia Carpio, J. C. <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Docente de la asignatura de Preparación y Evaluación de Proyectos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: juancarlosarancibiapio@gmail.com.

Recibido: 03/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Publicado: 10/11/2024

## RESUMEN

El desarrollo urbano de la Ciudad de Sucre, está en un momento crucial con la celebración de su bicentenario, lo que ofrece una oportunidad para reflexionar sobre su historia y mejorar su infraestructura. Este aniversario impulsa una serie de proyectos destinados a transformar el paisaje urbano y elevar la calidad de vida de sus habitantes. La Ingeniería Civil juega un papel vital en el diseño y ejecución de estas iniciativas, que van desde la rehabilitación de espacios públicos hasta la construcción de nuevas infraestructuras.

Las Megaobras del bicentenario buscan modernizar la Ciudad de Sucre de manera sostenible, enfrentando desafíos como el crecimiento poblacional y el cambio climático. El artículo analiza estos Megaproyectos desde la perspectiva de la Ingeniería Civil, evaluando su viabilidad técnica y su impacto social y ambiental. Se exploran las tensiones entre modernización y conservación del patrimonio cultural, así como la importancia de la participación ciudadana en la planificación.

La investigación se clasifica como aplicada y descriptiva, enfocándose en resolver problemas específicos del desarrollo urbano. Se documentan sistemáticamente los proyectos, recopilando datos cuantitativos y cualitativos para evaluar su impacto y alineación con las mejores prácticas. Se utilizarán métodos mixtos, combinando entrevistas y encuestas con análisis estadísticos, para ofrecer una visión integral sobre los efectos de estos proyectos en la Ciudad de Sucre. Finalmente, se verificará la información obtenida para asegurar su confiabilidad antes de sistematizar los datos.

**Palabras clave:** Desarrollo Urbano, Megaobras, Bicentenario de Bolivia, Ingeniería Civil.

## ABSTRACT

The urban development of the City of Sucre is at a crucial moment with the celebration of its bicentennial, which offers an opportunity to reflect on its history and improve its infrastructure. This anniversary drives a series of projects aimed at transforming the urban landscape and raising the quality of life of its inhabitants. Civil Engineering plays a vital role in the design and execution of these initiatives, which range from the rehabilitation of public spaces to the construction of new infrastructures.

The Mega Works of the bicentennial seek to modernize the City of Sucre in a sustainable way, facing challenges such as population growth and climate change. The article analyzes these Mega Projects from the perspective of Civil Engineering, evaluating their technical feasibility and their social and environmental impact. The tensions between modernization and conservation of cultural heritage are explored, as well as the importance of citizen participation in planning.

The research is classified as applied and descriptive, focusing on solving specific problems of urban development. The projects are systematically documented, collecting quantitative and qualitative data to evaluate their impact and alignment with best practices. Mixed methods will be used, combining interviews and surveys with statistical analysis, to provide a comprehensive view of the effects of these projects on the City of Sucre. Finally, the information obtained will be verified to ensure its reliability before systematizing the data. Finally, highlight the existence of two Regulations: Bolivian Construction Regulations and the Regulations for the Development of Economic Activities in the Construction Sector, as well as the Bolivian Guide to the Construction of Buildings.

**Key words:** Urban Development, Mega Projects, Bicentennial of Bolivia, Civil Engineering.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano de la Ciudad de Sucre, una Ciudad emblemática de Bolivia, se encuentra en un punto de inflexión marcado por la celebración de su bicentenario. Este aniversario no solo representa una oportunidad para reflexionar sobre la historia y la identidad de la Ciudad, sino que también impulsa la implementación de una serie de proyectos de infraestructura que buscan transformar su paisaje urbano y mejorar la calidad de vida de sus habitantes. En este contexto, la Ingeniería Civil emerge como una disciplina crucial para el diseño y ejecución de estas iniciativas, orientadas a abordar las necesidades actuales y futuras de la población.

Las Mega Obras del bicentenario abarcan una amplia gama de intervenciones, desde la rehabilitación de espacios públicos hasta la construcción de nuevas infraestructuras de transporte y servicios básicos. Estos esfuerzos no solo pretenden modernizar la ciudad, sino también garantizar que la Ciudad de Sucre se desarrolle de manera sostenible y resiliente ante los desafíos urbanos contemporáneos, tales como el crecimiento poblacional, la movilidad y el cambio climático.

Este artículo tiene como objetivo analizar estos proyectos desde la perspectiva de la Ingeniería Civil, evaluando su viabilidad técnica, impacto social y ambiental, y su capacidad para fomentar un desarrollo urbano equilibrado. A través de un enfoque crítico, se explorarán las tensiones entre la modernización y la conservación del patrimonio cultural, así como la importancia de la participación ciudadana en los procesos de planificación.

Al abordar estos temas, se busca proporcionar una visión integral de cómo los proyectos del bicentenario pueden contribuir a la construcción de una ciudad más habitable y sostenible. Este análisis no solo enriquecerá el debate académico sobre el desarrollo urbano en la Ciudad de Sucre, sino que también ofrecerá recomendaciones prácticas para la formulación de políticas públicas que promuevan un crecimiento equitativo y sostenible en la región.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este artículo se clasifica como una investigación aplicada y descriptiva, enfocada en el análisis de los proyectos del bicentenario en la Ciudad de Sucre desde la perspectiva de la Ingeniería Civil.

**Investigación Aplicada:** Se busca resolver problemas específicos relacionados con el desarrollo urbano de la Ciudad de Sucre, proponiendo soluciones prácticas y recomendaciones basadas en los resultados obtenidos. La investigación está orientada a contribuir al diseño y ejecución de proyectos que mejoren la infraestructura y la calidad de vida en la Ciudad de Sucre.

**Investigación Descriptiva:** A través de un enfoque descriptivo, se pretende documentar y analizar de manera

sistemática los diferentes proyectos implementados en el marco del bicentenario, evaluando sus características, objetivos y resultados. Esto incluye la recopilación de datos cuantitativos y cualitativos sobre el impacto de estos proyectos en la comunidad y su alineación con las mejores prácticas de la ingeniería civil.

Además, se utilizarán métodos de análisis mixto, combinando enfoques cualitativos, como entrevistas y encuestas a la ciudadanía y expertos, con análisis cuantitativos de datos estadísticos e indicadores de desarrollo urbano. Este enfoque permitirá una comprensión más completa de los efectos de los proyectos del bicentenario, facilitando la identificación de oportunidades y desafíos en el desarrollo urbano de la Ciudad de Sucre.

Al concluir con la etapa de recolección de información, se procedió a la edición de los mismos verificando con el informe presentado a la Carrera de Ingeniería Civil, de esta manera, otorgar confiabilidad y veracidad a la información obtenida, para luego proceder a la sistematización o tabulación de datos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con motivo de la celebración del Bicentenario de Bolivia, se han puesto en marcha una serie de megaproyectos enfocados en modernizar la infraestructura de la ciudad de Sucre. Estas Mega Obras buscan no solo conmemorar los 200 años de independencia, sino también transformar a la Ciudad de Sucre en una ciudad moderna, eficiente y alineada con los estándares internacionales de urbanización. Desde la expansión de la red vial hasta la construcción de nuevas instalaciones públicas, la modernización de la infraestructura urbana es esencial para mejorar la calidad de vida, el desarrollo económico y la sostenibilidad a largo plazo.

### Modernización de la Infraestructura en las Mega Obras del Bicentenario de la Ciudad de Sucre

Uno de los componentes más destacados de la modernización de la infraestructura en las Mega Obras del Bicentenario es la expansión y actualización de la red vial. La creciente población y el aumento del parque automotor en la Ciudad de Sucre han generado la necesidad de mejorar la infraestructura vial para reducir la congestión y mejorar la movilidad urbana. Para abordar estos desafíos, se están implementando varios proyectos clave:

## GRÁFICO N° 1: MODERNIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA



**Fuente:** Elaboración Propia

**Ampliación de avenidas principales:** La modernización incluye la ampliación de avenidas que conectan zonas estratégicas de la ciudad, permitiendo mayor fluidez vehicular. Esto mejora la conectividad entre áreas residenciales, comerciales e industriales, promoviendo un crecimiento más equilibrado de la Ciudad de Sucre.

**Construcción de nuevos accesos viales:** Se están desarrollando nuevas rutas y accesos a barrios y zonas que anteriormente carecían de infraestructura adecuada. Estas obras no solo mejoran el acceso a servicios esenciales, sino que también impulsan el desarrollo económico local.

**Mejora en la calidad de las carreteras:** Los proyectos incluyen la repavimentación de rutas con materiales duraderos que puedan soportar el tráfico pesado y las condiciones climáticas de la región, lo que reduce los costos de mantenimiento a largo plazo.

**Incorporación de ciclovías y áreas peatonales:** En línea con las tendencias globales de urbanización sostenible, los megaproyectos están integrando ciclovías y rutas peatonales que fomentan el transporte no motorizado, disminuyendo la huella de carbono y promoviendo un estilo de vida más saludable.

### Construcción de Nuevos Espacios Públicos en las Mega Obras del Bicentenario de la Ciudad de Sucre

Las Mega Obras del Bicentenario de Sucre son parte de una serie de iniciativas planificadas para conmemorar los 200 años de la ciudad, y un aspecto clave de estas obras es la creación de nuevos espacios públicos. Estos proyectos buscan mejorar la calidad de vida de los habitantes, revitalizar áreas urbanas y fortalecer el sentido de comunidad. En este artículo, analizamos la importancia y los beneficios de la construcción de nuevos espacios públicos en la Ciudad de Sucre, así

como los desafíos y oportunidades que estos proyectos presentan.

## GRÁFICO N° 2: NUEVOS ESPACIOS PÚBLICOS



**Fuente:** Elaboración Propia

**Importancia de los Espacios Públicos en el Desarrollo Urbano:** Los espacios públicos, como plazas, parques y áreas recreativas, son esenciales para el desarrollo urbano equilibrado. Actúan como puntos de encuentro para la interacción social, fomentan la cohesión comunitaria y mejoran la salud y el bienestar de los ciudadanos.

**Espacios de Convivencia Social:** La construcción de nuevos espacios públicos en la Ciudad de Sucre tiene el objetivo de promover la interacción social y la convivencia entre sus habitantes. Las plazas y parques son lugares donde las personas de todas las edades y orígenes pueden reunirse para actividades recreativas, culturales y comunitarias.

**Promoción de actividades culturales:** La creación de anfiteatros y áreas destinadas a eventos públicos permitirá que Sucre se convierta en un centro de actividad cultural, atrayendo tanto a locales como a turistas.

**Fortalecimiento del sentido de comunidad:** Los espacios públicos bien diseñados ayudan a fortalecer el sentido de pertenencia y de identidad colectiva, lo que contribuye a una sociedad más unida y resiliente.

**Mejora de la Calidad de Vida:** La construcción de espacios públicos bien planificados puede mejorar significativamente la calidad de vida de los habitantes al proporcionar áreas verdes, zonas recreativas y espacios para el esparcimiento. Estas áreas también fomentan el bienestar físico y mental al ofrecer lugares accesibles para el ejercicio y la relajación.

**Zonas verdes para el esparcimiento:** Los parques y jardines urbanos ayudan a mejorar el entorno natural de la ciudad, reduciendo la contaminación y proporcionando espacios para el deporte y la recreación.

**Reducción del estrés urbano:** Las áreas abiertas y los espacios verdes actúan como "pulmones" de la ciudad, proporcionando un ambiente de tranquilidad y

relajación que contrarresta el estrés asociado con la vida urbana.

**Fomento de la Inclusión Social:** Los nuevos espacios públicos son plataformas inclusivas donde personas de diferentes estratos sociales pueden interactuar en igualdad de condiciones. Esto contribuye a reducir la segregación y a promover una sociedad más cohesionada.

**Acceso universal:** La creación de espacios públicos accesibles para personas con discapacidades y otros grupos vulnerables refuerza el compromiso de la ciudad con la inclusión social.

### Diseño y Planificación de los Nuevos Espacios Públicos

El diseño y la planificación de los nuevos espacios públicos en Sucre se centran en garantizar que estos sean sostenibles, accesibles y multifuncionales. Los proyectos incorporan principios de urbanismo moderno que integran el entorno natural y las necesidades de la población.

**Diseño Sostenible.** La sostenibilidad es un factor clave en el diseño de los nuevos espacios públicos. Esto implica el uso de materiales respetuosos con el medio ambiente, la incorporación de tecnologías energéticamente eficientes y la integración de la naturaleza en el entorno urbano.

**Energía renovable:** Algunos espacios públicos, como plazas y parques, están diseñados para aprovechar la energía solar o eólica, mediante la instalación de paneles solares en estructuras de iluminación y en instalaciones recreativas.

**Uso de materiales reciclables:** Los proyectos también consideran el uso de materiales locales y reciclados para minimizar el impacto ambiental de la construcción.

### Planificación Multifuncional

Los espacios públicos no solo están diseñados para recreación, sino que también ofrecen funcionalidades múltiples que los convierten en espacios dinámicos y adaptables a las necesidades de la ciudad.

**Zonas recreativas y deportivas:** La creación de áreas deportivas, como canchas de fútbol, ciclismo y parques infantiles, fomenta el deporte y el bienestar físico.

**Áreas para eventos y mercados:** La inclusión de espacios flexibles para eventos culturales y mercados locales proporciona una plataforma para la economía local y la promoción de actividades culturales.

### Integración con el Patrimonio Histórico

En una ciudad con tanta historia como Sucre, la construcción de nuevos espacios públicos requiere una

cuidadosa integración con el patrimonio arquitectónico y cultural existente.

Esto se realiza mediante el diseño de proyectos que respetan la identidad histórica de la ciudad y, al mismo tiempo, modernizan su infraestructura.

**Restauración de áreas patrimoniales:** Algunos espacios públicos se sitúan en zonas históricas de la ciudad, donde se revitalizan edificaciones antiguas y monumentos como parte de los megaproyectos.

**Conexión entre lo antiguo y lo nuevo:** Los espacios públicos también crean una conexión entre las áreas históricas y los desarrollos modernos, facilitando la interacción entre ambas identidades urbanas.

### Impacto Económico y Social de los Nuevos Espacios Públicos

Los espacios públicos no solo mejoran la calidad de vida de los ciudadanos, sino que también tienen un impacto económico positivo. Estos proyectos pueden generar empleo, atraer inversiones y promover el turismo, haciendo de Sucre una ciudad más atractiva y competitiva.

### Aumento del Turismo

La creación de nuevos espacios públicos, como plazas, parques y áreas culturales, incrementa el atractivo turístico de Sucre. Estos proyectos permiten que la ciudad ofrezca nuevas experiencias para los visitantes, desde actividades culturales hasta la observación de su patrimonio.

**Crecimiento del turismo cultural:** Al contar con nuevas áreas dedicadas a eventos y festivales, Sucre atraerá más turistas interesados en la historia, la cultura y las celebraciones del Bicentenario.

**Turismo recreativo:** Los nuevos parques y zonas verdes también atraerán a visitantes que buscan áreas para el descanso y la recreación, lo que podría generar nuevas oportunidades de negocio y empleo.

### Generación de Empleo

La construcción y el mantenimiento de los espacios públicos generan empleo en diversas etapas, desde la planificación y el diseño hasta la operación de las instalaciones.

**Empleo en construcción:** Los megaproyectos requieren una considerable fuerza laboral, contribuyendo a la economía local mediante la generación de puestos de trabajo en la construcción.

**Empleo en mantenimiento y gestión:** Una vez completados, los nuevos espacios públicos también requieren personal para su mantenimiento y administración, lo que contribuye a la creación de empleos a largo plazo.

## Fomento del Comercio Local

Los espacios públicos también pueden impulsar el comercio local. La creación de áreas para mercados y eventos permite que los pequeños comerciantes y emprendedores locales tengan un espacio donde ofrecer sus productos y servicios. Mercados artesanales y gastronómicos: Los mercados al aire libre y ferias que se realicen en estos nuevos espacios ofrecerán una plataforma para la venta de productos locales, impulsando la economía del turismo y el comercio.

## Desafíos y Oportunidades

A pesar de los numerosos beneficios que los nuevos espacios públicos traen a Sucre, también presentan ciertos desafíos que deben ser abordados para garantizar su éxito y sostenibilidad a largo plazo.

### Mantenimiento a Largo Plazo

Uno de los principales desafíos es el mantenimiento continuo de estos espacios. Sin una gestión adecuada, los parques y plazas pueden deteriorarse rápidamente, lo que afectaría tanto su funcionalidad como su atractivo.

**Fondos de mantenimiento:** Es esencial que los megaproyectos incluyan planes a largo plazo para el financiamiento de las operaciones de mantenimiento, asegurando la preservación de las instalaciones.

**Participación ciudadana en el cuidado:** Fomentar la participación de la comunidad en el mantenimiento de los espacios públicos puede ayudar a preservar su calidad y a promover una mayor apropiación ciudadana.

### Seguridad y Accesibilidad

Otro desafío importante es garantizar que los nuevos espacios públicos sean seguros y accesibles para todos los ciudadanos, incluidos los grupos más vulnerables.

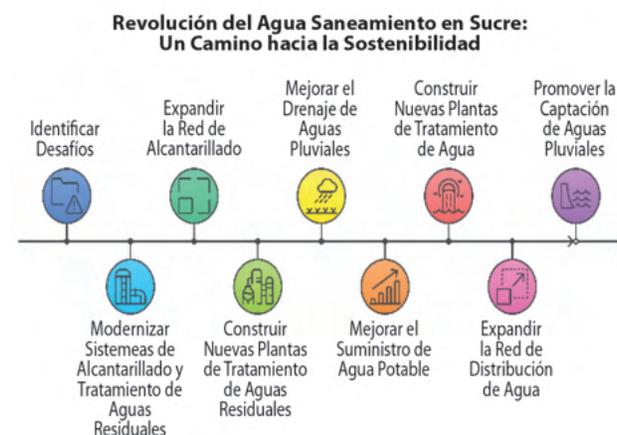
**Seguridad pública:** La iluminación adecuada, la presencia de personal de seguridad y la implementación de tecnologías de vigilancia pueden mejorar la seguridad de los usuarios.

**Accesibilidad para todos:** Es crucial que los espacios públicos sean inclusivos y accesibles para personas con discapacidades, garantizando que puedan disfrutar plenamente de las instalaciones.

## Saneamiento y Gestión de Recursos en las Mega Obras del Bicentenario de la Ciudad de Sucre

Uno de los pilares fundamentales en las Mega Obras del Bicentenario de Sucre es la mejora de los sistemas de saneamiento y gestión de recursos hídricos. A medida que la ciudad crece en población e infraestructura, la demanda sobre los recursos básicos, como el agua potable y los servicios de alcantarillado, aumenta significativamente.

## GRÁFICO N° 3: SANEAMIENTO Y GESTIÓN DE RECURSOS



**Fuente:** Elaboración Propia

Desde una perspectiva de Ingeniería Civil, la modernización de estos sistemas es esencial para garantizar una mejor calidad de vida para los habitantes, proteger el medio ambiente y sentar las bases para un desarrollo urbano sostenible.

## Desafíos Actuales en Saneamiento y Gestión de Recursos

Sucre enfrenta varios desafíos clave en términos de infraestructura de saneamiento y gestión de agua:

**Sistemas obsoletos:** Muchas de las redes de alcantarillado y tratamiento de aguas en la ciudad han estado operando más allá de su capacidad y han sufrido un deterioro considerable debido a la falta de mantenimiento y renovación.

**Crecimiento demográfico:** La ciudad ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, lo que ha generado una mayor presión sobre los sistemas existentes. Los barrios más nuevos y áreas periféricas, en particular, carecen de acceso adecuado a estos servicios.

**Impacto ambiental:** Los problemas relacionados con la disposición inadecuada de aguas residuales y el manejo de aguas pluviales han contribuido a la contaminación de fuentes de agua locales y a la degradación de ecosistemas naturales.

**Escasez de agua:** En un contexto de cambio climático, Sucre, como muchas otras ciudades de la región, enfrenta desafíos relacionados con la disponibilidad de agua potable. La mala gestión de los recursos hídricos agrava este problema. Estos desafíos son el punto de partida para las Mega Obras del Bicentenario, que buscan renovar y ampliar la infraestructura de saneamiento y agua potable, promoviendo la eficiencia y la sostenibilidad. Modernización de los Sistemas de Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Residuales. Una de las principales prioridades en los megaproyectos

es la modernización del sistema de alcantarillado y la construcción de nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales. Esto es esencial para garantizar que la ciudad pueda manejar tanto las aguas residuales domésticas como las industriales de manera eficaz, sin poner en riesgo la salud pública ni contaminar el entorno natural.

**Ampliación de la red de alcantarillado:** Las obras incluyen la expansión de la red de alcantarillado en las zonas más antiguas de la ciudad y en los nuevos desarrollos urbanos. Los nuevos sistemas están diseñados para ser más resistentes, con materiales duraderos que soporten el desgaste a largo plazo y reduzcan la necesidad de mantenimiento constante.

**Tratamiento de aguas residuales:** Se están construyendo nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales, que utilizan tecnologías modernas para garantizar que el agua tratada cumpla con los estándares ambientales antes de ser devuelta al ciclo natural. Estas plantas no solo mejorarán la calidad del agua, sino que también contribuirán a la reducción de la contaminación en ríos y arroyos locales, protegiendo los ecosistemas acuáticos.

**Drenaje pluvial:** Un aspecto clave del saneamiento es la gestión del agua de lluvia. Los sistemas de drenaje pluvial, que han sido ineficientes en muchas áreas de Sucre, están siendo modernizados para evitar inundaciones en la temporada de lluvias. Esto incluye la construcción de colectores subterráneos y sistemas de almacenamiento temporal para controlar el flujo de agua durante las tormentas.

### Abastecimiento de Agua Potable

Otro componente crucial de los megaproyectos del Bicentenario es el mejoramiento en la captación y distribución de agua potable. El acceso a agua limpia y segura es un derecho fundamental, y Sucre está tomando medidas significativas para asegurar que toda su población, incluidas las zonas más alejadas, tenga un suministro adecuado.

**Construcción de nuevas plantas de tratamiento:** Se están desarrollando nuevas instalaciones para la potabilización del agua, utilizando tecnologías avanzadas que permiten una mayor eficiencia en el proceso de purificación. Esto asegura que el agua que llega a los hogares esté libre de contaminantes y sea apta para el consumo humano.

**Ampliación de la red de distribución:** Al igual que en el caso del alcantarillado, la red de distribución de agua potable se está expandiendo para cubrir áreas que anteriormente no contaban con un suministro adecuado. Esta expansión permitirá que los barrios más distantes también puedan beneficiarse de los avances en la gestión del agua.

**Recolección de agua de lluvia:** En línea con los esfuerzos globales hacia la sostenibilidad, los proyectos del Bicentenario están promoviendo la instalación de sistemas de captación de agua de lluvia para usos no potables, como el riego de parques y jardines o la limpieza de calles. Esto alivia la presión sobre el sistema principal de agua potable y fomenta el uso eficiente de los recursos hídricos.

### Impacto Ambiental y Social en las Mega Obras del Bicentenario de la Ciudad de Sucre

Las Mega Obras del Bicentenario de Sucre no solo buscan mejorar la infraestructura y modernizar la ciudad, sino que también tienen un impacto considerable en los ámbitos ambiental y social. A medida que la Ciudad de Sucre celebra 200 años de independencia, la transformación urbana se presenta como una oportunidad para abordar problemas críticos relacionados con el medio ambiente, la sostenibilidad y el bienestar social de sus ciudadanos.

#### GRÁFICO N° 4: IMPACTO SOCIAL Y AMBIENTAL



Fuente: Elaboración Propia

### Impacto Ambiental

El desarrollo urbano trae consigo desafíos significativos para el medio ambiente, desde la utilización de recursos naturales hasta la generación de residuos y emisiones. Sin embargo, los megaproyectos del Bicentenario de Sucre han sido diseñados con un enfoque en minimizar los impactos negativos y promover un desarrollo más sostenible.

### Gestión de Residuos y Reciclaje

Los proyectos del Bicentenario incluyen planes para mejorar la gestión de residuos sólidos urbanos. Con el crecimiento poblacional y el aumento en la actividad económica, Sucre ha enfrentado un incremento en la producción de desechos, lo que ha desbordado la capacidad de los sistemas tradicionales de recolección y disposición.

**Implementación de infraestructuras de reciclaje:**

Se están estableciendo nuevas plantas de reciclaje y centros de tratamiento de residuos que fomentan la clasificación en origen y la reutilización de materiales. Esto no solo reduce la cantidad de basura que termina en los vertederos, sino que también impulsa una economía circular en la ciudad.

**Reducción de residuos de construcción:** Los megaproyectos están adoptando prácticas de construcción sostenibles, como el reciclaje de materiales de construcción y el uso de tecnologías que minimizan la producción de escombros.

**Conservación de Recursos Naturales**

La preservación de los recursos hídricos y la biodiversidad es un eje clave en la planificación de estos proyectos. La modernización de los sistemas de agua potable y saneamiento contribuye a reducir la contaminación de los ríos y lagunas de la región, que anteriormente se veían afectados por el vertido de aguas residuales sin tratar.

**Restauración de cuerpos de agua:** Como parte de los megaproyectos, se están implementando iniciativas para restaurar y proteger los cuerpos de agua locales, mediante la construcción de sistemas avanzados de tratamiento de aguas residuales y pluviales. Estas obras mejorarán la calidad del agua y reducirán el impacto negativo en los ecosistemas acuáticos.

**Zonas verdes urbanas:** El diseño de los megaproyectos incluye la creación de parques y áreas verdes que contribuyen a la regulación del clima urbano, la captura de carbono y el mantenimiento de la biodiversidad. Estas áreas verdes no solo sirven como espacios de recreación, sino que también ayudan a mitigar los efectos de la urbanización acelerada sobre el medio ambiente.

**Eficiencia Energética y Reducción de Emisiones**

Los megaproyectos del Bicentenario también están alineados con las metas globales de reducción de emisiones de carbono y eficiencia energética. La incorporación de tecnologías verdes y soluciones energéticamente eficientes es una de las prioridades para minimizar el impacto ambiental.

**Edificaciones sostenibles:** Se está promoviendo la construcción de edificios eficientes desde el punto de vista energético, con el uso de tecnologías como paneles solares, sistemas de aislamiento térmico y materiales de bajo impacto ambiental.

**Eficiencia en el alumbrado público:** Los sistemas de alumbrado público que se están instalando en la ciudad usan tecnología LED y están equipados con controles inteligentes para optimizar el consumo de energía, reduciendo tanto las emisiones de gases de efecto invernadero como los costos operativos.

**Impacto Social**

El impacto social de los megaproyectos del Bicentenario es profundo y transformador, ya que no solo busca mejorar la infraestructura, sino también la calidad de vida de los ciudadanos de Sucre. Este componente es fundamental para garantizar que la modernización sea inclusiva y que los beneficios sean compartidos por todos los sectores de la sociedad.

**Generación de Empleo**

Una de las contribuciones más directas e inmediatas de los megaproyectos es la generación de empleo. Tanto en las fases de construcción como en la operación de las nuevas infraestructuras, los proyectos proporcionan oportunidades de trabajo para miles de personas, desde ingenieros y arquitectos hasta obreros y técnicos especializados.

**Empleo directo:** Las grandes obras de infraestructura requieren una gran cantidad de mano de obra, lo que contribuye a reducir el desempleo y a dinamizar la economía local durante los años de ejecución de los proyectos.

**Empleo indirecto:** Además del empleo directo, los megaproyectos generan empleo indirecto en sectores relacionados como el transporte, la venta de materiales de construcción, el comercio local y los servicios.

**Mejora en la Calidad de Vida**

La modernización de la infraestructura urbana tiene un impacto directo en la calidad de vida de los ciudadanos de Sucre. Los nuevos sistemas de transporte, saneamiento y distribución de agua potable permiten un acceso más equitativo a los servicios esenciales y mejoran las condiciones de vida, especialmente en las zonas más vulnerables de la ciudad.

**Acceso a servicios básicos:** Los proyectos de saneamiento y agua potable aseguran que todos los sectores de la ciudad, incluidos los barrios periféricos, tengan acceso a estos servicios. Esto contribuye a la reducción de enfermedades transmitidas por el agua y mejora las condiciones de higiene.

**Desarrollo de espacios públicos:** Los nuevos parques, plazas y centros recreativos no solo brindan áreas de esparcimiento para la población, sino que también fomentan la cohesión social y el sentido de comunidad.

**Inclusión y Participación Ciudadana**

Un aspecto relevante en los megaproyectos es la participación de la comunidad en el proceso de planificación y ejecución de las obras. A través de mecanismos de consulta pública y mesas de diálogo, se han involucrado a los ciudadanos en la toma de decisiones, lo que garantiza que las soluciones

propuestas respondan a las necesidades reales de la población.

**Consultas y foros ciudadanos:** Estos espacios de participación permiten a los residentes expresar sus preocupaciones y sugerencias, lo que ha influido en la priorización de los proyectos y en la implementación de medidas para mitigar posibles impactos negativos.

**Equidad en la distribución de beneficios:** Los megaproyectos buscan promover la equidad social, garantizando que los beneficios de la modernización lleguen a todos los sectores de la ciudad, incluidos los más vulnerables. Esto se refleja en la priorización de infraestructuras en áreas de bajos ingresos y en el acceso igualitario a los servicios.

### Desafíos y Consideraciones

A pesar de los beneficios significativos, los megaproyectos también presentan desafíos en términos de gestión y ejecución. Uno de los principales retos es minimizar los desplazamientos forzados y los impactos negativos en las comunidades locales durante la construcción de las nuevas infraestructuras.

**Desplazamiento de residentes:** Algunos proyectos de infraestructura, como la ampliación de vías o la construcción de nuevos edificios públicos, pueden requerir el desplazamiento de familias que viven en áreas afectadas. Para mitigar estos impactos, se están implementando programas de reubicación y compensación justa para los afectados.

**Impacto en el tráfico y la movilidad:** Durante la fase de construcción, las obras pueden causar interrupciones temporales en el tráfico y la movilidad de los ciudadanos. Es crucial que las autoridades locales implementen medidas de mitigación, como rutas alternas y sistemas de información para minimizar los inconvenientes.

### Construcción de Edificaciones Públicas y Monumentos en las Mega Obras del Bicentenario de la Ciudad de Sucre

En el marco de las celebraciones del Bicentenario de Sucre, los megaproyectos propuestos incluyen la construcción de edificaciones públicas y monumentos emblemáticos que servirán no solo como espacios funcionales para el desarrollo administrativo, cultural y social de la ciudad, sino también como símbolos conmemorativos de su rica historia. Desde el punto de vista de la ingeniería civil, estos proyectos representan un desafío en términos de diseño arquitectónico, planificación urbana y sostenibilidad, buscando transformar Sucre en una ciudad moderna y resiliente, sin perder de vista su patrimonio y legado histórico.

### GRÁFICO N° 5: EDIFICACIONES PÚBLICAS Y MONUMENTOS



**Fuente:** Elaboración Propia

### Edificaciones Públicas: Modernización y Ampliación de Infraestructura

La construcción de nuevas edificaciones públicas forma parte de la estrategia para dotar a Sucre de instalaciones capaces de atender las demandas de una población en crecimiento y de una administración más eficiente. Estos edificios incluyen oficinas gubernamentales, centros de salud, centros educativos y espacios culturales.

### Nuevos Complejos Gubernamentales

El crecimiento poblacional y la necesidad de modernización administrativa exigen nuevas infraestructuras que ofrezcan mayor capacidad y mejores servicios.

**Diseño funcional y sostenible:** Los nuevos edificios gubernamentales no solo buscan ser más funcionales, sino también respetuosos con el medio ambiente. Se están aplicando principios de diseño bioclimático, utilizando ventilación natural, energía solar y sistemas de eficiencia energética para reducir el consumo de recursos.

**Centralización de servicios:** Los megaproyectos están orientados a la construcción de complejos administrativos que centralicen varios servicios públicos en un solo lugar, facilitando el acceso a la ciudadanía y reduciendo el tiempo de trámites.

### Centros de Salud y Educación

El fortalecimiento de los sistemas de salud y educación es clave para garantizar el bienestar de la población de Sucre. En este sentido, los megaproyectos contemplan la construcción de hospitales, centros de atención primaria y nuevos colegios y universidades.

**Hospitales y centros médicos:** La construcción de nuevos hospitales y la ampliación de los existentes

permitirán una mejor cobertura médica en la ciudad. Estos proyectos están diseñados con la más alta tecnología, garantizando la atención especializada y la mejora de las instalaciones de emergencia y consulta externa.

**Centros educativos:** En el sector educativo, se están construyendo nuevos colegios y universidades, con un enfoque en dotar de infraestructuras modernas que fomenten un ambiente de aprendizaje innovador, equipado con laboratorios, bibliotecas y espacios de investigación de vanguardia.

### Espacios Culturales y Deportivos

El fortalecimiento de la infraestructura cultural y deportiva también es esencial para el desarrollo integral de la sociedad sucreña. La construcción de centros culturales y deportivos modernos busca proporcionar a la población espacios de recreación y esparcimiento, contribuyendo a la cohesión social y el desarrollo comunitario.

**Teatros y auditorios:** Los nuevos teatros, museos y auditorios permitirán a la ciudad tener una infraestructura adecuada para albergar eventos culturales de gran envergadura, desde conciertos y exposiciones hasta representaciones teatrales.

**Centros deportivos:** Los megaproyectos incluyen la construcción de polideportivos y estadios para fomentar la actividad física y el deporte en la comunidad. Estas infraestructuras no solo están diseñadas para eventos locales, sino también para albergar competencias nacionales e internacionales.

**Monumentos Conmemorativos:** Preservación del Patrimonio e Identidad Histórica.

Un componente central de los megaproyectos del Bicentenario es la construcción de monumentos conmemorativos que reflejan la importancia histórica de Sucre como Cuna de la Libertad de América y capital constitucional de Bolivia. Estos monumentos serán símbolos de identidad y orgullo local, con el propósito de fortalecer el vínculo entre la población y su patrimonio.

### Monumentos Históricos

Entre los proyectos destacados está la creación de monumentos conmemorativos dedicados a los héroes de la independencia y a los hitos históricos más relevantes en los 200 años de vida republicana de Bolivia.

**Estatua del Bicentenario:** Se proyecta una estatua monumental que representará los valores de libertad y justicia que caracterizan la independencia boliviana. Este monumento se ubicará en un lugar emblemático de la ciudad, probablemente en una nueva plaza central o en la Avenida del Bicentenario, que también se está renovando.

**Paseo de los Libertadores:** Otro proyecto destacado es la creación de un Paseo de los Libertadores, una avenida o boulevard que contará con estatuas y monumentos que homenajearán a los personajes más importantes de la independencia de Bolivia y de América Latina. Este paseo servirá como un espacio de reflexión histórica, combinando elementos artísticos y paisajísticos.

### Restauración de Monumentos Patrimoniales

Además de la construcción de nuevos monumentos, los megaproyectos del Bicentenario también incluyen la restauración de monumentos históricos que han sido parte del patrimonio cultural de Sucre durante siglos.

**Restauración de iglesias y edificios coloniales:** Sucre es conocida por su arquitectura colonial, que es patrimonio de la humanidad. Como parte de los megaproyectos, se están llevando a cabo trabajos de restauración en iglesias, conventos y edificios históricos para conservar su valor arquitectónico y cultural. Estas restauraciones están guiadas por principios de conservación que respetan las técnicas originales de construcción.

**Museo del Bicentenario:** Se planea la creación de un museo dedicado a la historia del Bicentenario, que albergará documentos, artefactos y exposiciones relacionadas con la independencia de Bolivia y la historia de Sucre. Este museo servirá como un centro educativo y cultural para las generaciones futuras.

### Impacto Social y Cultural de las Nuevas Infraestructuras

La construcción de edificaciones públicas y monumentos en el marco del Bicentenario tendrá un profundo impacto social y cultural en Sucre. Estos proyectos no solo buscan modernizar la ciudad desde el punto de vista infraestructural, sino también promover un sentido de pertenencia y orgullo en los ciudadanos.

### Revalorización del Patrimonio Cultural

Los monumentos y espacios públicos que se construirán en el marco del Bicentenario tienen como objetivo revalorizar el patrimonio cultural e histórico de Sucre. La inversión en monumentos y plazas históricas no solo atraerá a turistas, sino que también permitirá a los ciudadanos locales reconectarse con su historia.

### Espacios de Convivencia y Participación Ciudadana

La creación de nuevas plazas, parques y monumentos contribuirá a la creación de espacios de convivencia donde los ciudadanos podrán reunirse, socializar y participar en actividades culturales. Estos espacios promoverán la cohesión social y la participación ciudadana, fomentando un sentido de comunidad más fuerte.

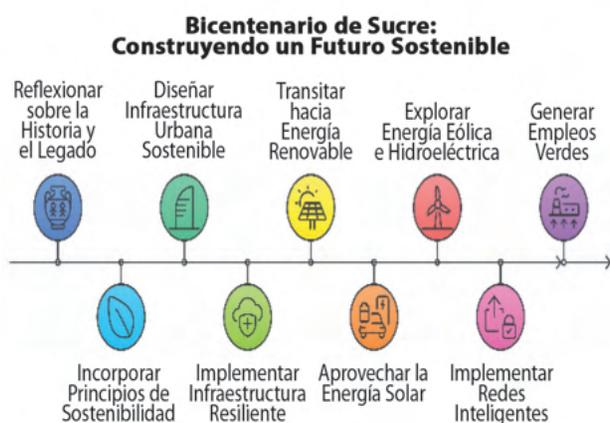
### Atractivo Turístico

La construcción de monumentos emblemáticos y la restauración de edificaciones históricas incrementarán el atractivo turístico de Sucre, lo que tendrá un impacto positivo en la economía local. Los monumentos y espacios públicos asociados al Bicentenario se convertirán en puntos clave de interés para los turistas nacionales e internacionales, generando ingresos y oportunidades económicas para la población.

### Sostenibilidad y Energías Renovables en las Mega Obras del Bicentenario de la Ciudad de Sucre

La celebración del Bicentenario de Sucre no solo es una oportunidad para reflexionar sobre la historia y el legado de la ciudad, sino también para proyectarla hacia un futuro más sostenible y resiliente. La incorporación de principios de sostenibilidad y el uso de energías renovables en los megaproyectos del Bicentenario es fundamental para enfrentar los desafíos ambientales, reducir la dependencia de combustibles fósiles y promover un desarrollo urbano más consciente con el medio ambiente. Este artículo analiza cómo los proyectos de infraestructura, edificaciones públicas y modernización de la ciudad están alineados con objetivos de sostenibilidad y el uso de energías limpias.

#### GRÁFICO N° 6: SOSTENIBILIDAD Y ENERGÍAS RENOVABLES



**Fuente:** Elaboración Propia

### Sostenibilidad en la Planificación Urbana

Uno de los principales retos que enfrenta Sucre es la necesidad de crecimiento urbano equilibrado con el respeto al entorno natural. La sostenibilidad en la planificación de las Mega Obras del Bicentenario implica crear infraestructuras que utilicen los recursos de manera eficiente, minimizando el impacto ambiental y mejorando la calidad de vida de los ciudadanos.

### Diseño Urbano Sostenible

Los principios de diseño urbano sostenible están presentes en varias áreas de los megaproyectos, como la

construcción de edificaciones públicas y la creación de espacios verdes.

**Áreas verdes y parques urbanos:** Se están proyectando parques y zonas verdes que actúan como “pulmones” de la ciudad, mejorando la calidad del aire, regulando la temperatura urbana y proporcionando espacios de recreación. Estos espacios también ayudan a absorber el exceso de agua durante las lluvias, reduciendo el riesgo de inundaciones en las zonas urbanas.

**Reducción de la huella de carbono:** En los nuevos desarrollos urbanos, se busca implementar materiales de construcción sostenibles, reducir la huella de carbono de las edificaciones y promover la movilidad sostenible. Esto incluye la construcción de vías para bicicletas, la mejora del transporte público y la reducción de la dependencia del uso de automóviles privados.

### Infraestructura Resiliente

Los megaproyectos del Bicentenario están diseñados con un enfoque hacia la resiliencia, lo que significa que deben ser capaces de adaptarse a los impactos del cambio climático y resistir fenómenos meteorológicos extremos.

**Sistemas de drenaje urbano:** Uno de los desafíos en Sucre es la gestión del agua pluvial, especialmente en la temporada de lluvias. Se están implementando sistemas avanzados de drenaje urbano que permiten una gestión más eficiente del agua, previniendo inundaciones y mejorando la capacidad de absorción de las áreas urbanas.

**Edificios energéticamente eficientes:** Los nuevos edificios públicos y residenciales se diseñan con características que permiten una mayor eficiencia energética, como la aislación térmica para reducir el consumo de energía en calefacción y refrigeración, y la integración de tecnologías que optimizan el uso de energía en iluminación y climatización.

### Energías Renovables en las Mega Obras

La transición hacia energías renovables es una prioridad en los megaproyectos del Bicentenario, no solo para reducir la dependencia de combustibles fósiles, sino también para garantizar que Sucre se posicione como una ciudad pionera en la adopción de tecnologías limpias.

### Energía Solar

Debido a la ubicación geográfica de Sucre, la energía solar es una de las fuentes más prometedoras para generar electricidad de manera sostenible. Los megaproyectos del Bicentenario incluyen la instalación de paneles solares en edificios públicos y el desarrollo de plantas solares en las afueras de la ciudad.

**Paneles solares en edificios públicos:** Una de las metas principales es que las edificaciones nuevas, como centros educativos, hospitales y oficinas gubernamentales, integren paneles solares fotovoltaicos en sus diseños. Esto no solo reduce el consumo de electricidad de la red convencional, sino que también crea un modelo de autosuficiencia energética.

**Plantas solares:** En las afueras de Sucre, se están planificando proyectos de energía solar a gran escala que permitan abastecer una parte considerable de la demanda eléctrica de la ciudad. Estas plantas solares contribuirán a diversificar la matriz energética de la región y a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

### Energía Eólica

Si bien Sucre no se encuentra en una de las regiones más ventosas de Bolivia, existe potencial para instalar turbinas eólicas en áreas seleccionadas. Los estudios preliminares están evaluando la viabilidad de proyectos eólicos a pequeña escala en zonas cercanas a la ciudad que puedan complementar el uso de energía solar.

**Turbinas eólicas urbanas:** En combinación con la energía solar, las turbinas eólicas podrían instalarse en ciertas áreas de la ciudad para proporcionar electricidad a escala local, especialmente en áreas industriales o comerciales.

### Energía Hidráulica

La energía hidráulica es otra fuente importante de electricidad en Bolivia. Los megaproyectos del Bicentenario consideran el uso de pequeñas plantas hidroeléctricas que no solo contribuyen a la generación de energía, sino que también permiten una mejor gestión de los recursos hídricos en la región.

**Pequeñas represas y centrales hidroeléctricas:** Estos proyectos se diseñan para operar a menor escala, minimizando el impacto ambiental en los ecosistemas locales, mientras generan electricidad limpia para la ciudad.

### Redes Inteligentes (Smart Grids)

Para optimizar el uso de las energías renovables, los megaproyectos también incluyen la implementación de redes eléctricas inteligentes que permiten una gestión eficiente de la electricidad generada. Estas redes están diseñadas para integrar múltiples fuentes de energía renovable y garantizar una distribución equilibrada de la electricidad en la ciudad.

**Monitorización en tiempo real:** A través de sistemas de gestión inteligente, será posible monitorizar en tiempo real el consumo de energía en los diferentes sectores de la ciudad, optimizando su uso y evitando pérdidas.

**Incorporación de almacenamiento energético:** La incorporación de tecnologías de almacenamiento, como baterías, permitirá almacenar el exceso de energía solar y eólica generada durante los momentos de mayor producción y utilizarla cuando la demanda sea alta.

### Impacto Social y Económico de las Energías Renovables

La implementación de energías renovables en los megaproyectos del Bicentenario no solo tiene un impacto ambiental positivo, sino que también transforma la economía local y mejora la calidad de vida de los ciudadanos.

### Generación de Empleo Verde

Los proyectos de energía renovable y sostenibilidad están creando nuevas oportunidades de empleo en sectores emergentes. La construcción, operación y mantenimiento de plantas solares, instalaciones de energía eólica y sistemas de redes inteligentes requieren técnicos especializados, ingenieros y personal capacitado.

**Capacitación laboral:** Parte de los megaproyectos incluye programas de capacitación y formación profesional en energías renovables, lo que generará una nueva generación de trabajadores especializados en tecnologías limpias.

### Reducción de Costos Energéticos

El uso de energías renovables en la ciudad de Sucre reducirá los costos de energía a largo plazo, beneficiando tanto a los hogares como a las empresas. Esto también permitirá una mayor independencia energética de la ciudad, disminuyendo su vulnerabilidad ante fluctuaciones en el precio de los combustibles fósiles.

### Mejora en la Calidad de Vida

El uso de tecnologías limpias no solo mejora el medio ambiente, sino que también reduce la contaminación del aire, lo que tiene un impacto directo en la salud de la población. Menos emisiones de gases contaminantes significan menos problemas respiratorios y un entorno urbano más saludable para los ciudadanos.

### Análisis Geotécnico y Prevención de Riesgos en las Mega Obras del Bicentenario de la Ciudad de Sucre

Las Mega Obras del Bicentenario de Sucre, diseñados para conmemorar los 200 años de historia de la ciudad, implican la construcción de infraestructuras significativas, desde edificaciones públicas hasta espacios culturales. Un análisis geotécnico riguroso y la implementación de medidas de prevención de riesgos son esenciales para garantizar la seguridad y durabilidad de estas obras. Este artículo examina los aspectos geotécnicos relevantes y las estrategias de mitigación de riesgos en el contexto de los megaproyectos en Sucre.

## GRÁFICO N° 7: ANÁLISIS GEOTÉCNICO Y PREVENCIÓN DE RIESGOS



**Fuente:** Elaboración Propia

### Importancia del Análisis Geotécnico

El análisis geotécnico se centra en estudiar las propiedades del suelo y las rocas en las que se construirán las infraestructuras. La geotecnia es crucial en las fases de diseño y construcción, ya que influye en la estabilidad, capacidad de carga y comportamiento de las estructuras.

### Evaluación de Suelos y Materiales

Los estudios geotécnicos incluyen la recolección de datos sobre la composición del suelo, la distribución de aguas subterráneas y la resistencia a compresión de los materiales.

**Esta información es vital para determinar:** Tipos de cimentación: Según la capacidad de carga del suelo, se seleccionan diferentes tipos de cimentaciones, como pilotes, zapatas o losas de cimentación.

**Diseño de estructuras:** Los resultados del análisis influyen en el diseño estructural, asegurando que las edificaciones sean resistentes y estables.

### Identificación de Problemas Geotécnicos

La identificación temprana de problemas geotécnicos, como deslizamientos de tierra, hundimientos o inestabilidad de taludes, es fundamental para prevenir fallos en la construcción.

**Estudios de inclinometría y perforación:** Estos estudios permiten monitorear los movimientos del terreno y detectar cambios que puedan afectar la estabilidad de las obras.

**Modelado geotécnico:** Utilizando software especializado, se pueden realizar simulaciones que

ayuden a prever el comportamiento del suelo bajo diferentes condiciones de carga y humedad.

### Prevención de Riesgos en la Construcción

La implementación de medidas de prevención de riesgos es esencial para garantizar la seguridad de los trabajadores y la integridad de las infraestructuras durante y después de la construcción.

### Análisis de Riesgos Geológicos

Sucre presenta características geológicas que pueden representar riesgos durante la ejecución de proyectos, como:

**Sismos:** La región está sujeta a actividad sísmica, lo que requiere un diseño estructural que considere los códigos antisísmicos aplicables.

**Deslizamientos:** Las pendientes y la erosión del suelo son factores de riesgo en ciertas áreas, que deben ser evaluados y mitigados mediante técnicas de estabilización de taludes.

### Medidas de Mitigación

Para prevenir riesgos, se implementan diversas medidas de mitigación:

**Diseños antisísmicos:** Las estructuras se diseñan para resistir fuerzas sísmicas, incorporando tecnologías como sistemas de amortiguación y estructuras flexibles.

**Estabilización de taludes:** En zonas propensas a deslizamientos, se pueden utilizar técnicas de estabilización como muros de contención, drenes y reforestación para disminuir la erosión del suelo.

**Monitoreo continuo:** Se instalan sensores y sistemas de monitoreo para detectar movimientos del terreno y niveles de agua subterránea, permitiendo una respuesta rápida ante posibles problemas.

### Capacitación y Conciencia de Riesgos

La capacitación del personal involucrado en los megaproyectos es crucial para la prevención de accidentes y la promoción de una cultura de seguridad.

### Capacitación en Seguridad Laboral

**Los trabajadores deben recibir formación en:** Protocolos de seguridad: Incluyendo el uso adecuado de equipos de protección personal (EPP) y la identificación de situaciones de riesgo.

**Manejo de emergencias:** Capacitación para actuar ante desastres naturales o incidentes laborales, garantizando la seguridad de todos los involucrados.

### Conciencia sobre el Entorno Geotécnico

Es importante que los profesionales del sector de la construcción estén conscientes de las características geotécnicas de la región y de los riesgos asociados. Esto se logra a través de:

**Talleres de actualización:** Programas de formación continua que incluyan estudios geotécnicos, nuevas tecnologías de construcción y gestión de riesgos.

**Trabajo colaborativo:** Fomentar la colaboración entre ingenieros civiles, geólogos y arquitectos para abordar los desafíos geotécnicos desde un enfoque integral.

### Impacto Social y Ambiental de la Gestión de Riesgos

La correcta implementación de análisis geotécnicos y medidas de prevención de riesgos tiene un impacto positivo en la comunidad y el medio ambiente.

### Seguridad de la Población

Las edificaciones construidas con un adecuado análisis geotécnico y prevención de riesgos ofrecen mayor seguridad a la población, reduciendo el riesgo de colapsos o accidentes durante eventos sísmicos o lluvias intensas.

### Sostenibilidad Ambiental

Las prácticas de construcción sostenibles que consideran el entorno geotécnico también contribuyen a la protección del medio ambiente, minimizando la erosión del suelo y el impacto sobre los ecosistemas locales.

### Desarrollo Económico Local

La ejecución eficiente y segura de los megaproyectos contribuye al desarrollo económico de Sucre, generando empleo y atrayendo inversiones al garantizar la seguridad y estabilidad de las nuevas infraestructuras.

### Impacto a Largo Plazo y Desarrollo Urbano en las Mega Obras del Bicentenario de la Ciudad de Sucre

La conmemoración del Bicentenario de Sucre representa una oportunidad clave para transformar la ciudad mediante una serie de megaproyectos que apuntan no solo a honrar su historia, sino a proyectarla hacia un futuro de crecimiento y desarrollo sostenible. Estos megaproyectos tienen implicaciones a largo plazo en el desarrollo urbano, la calidad de vida de los habitantes y la proyección de Sucre como una ciudad moderna y competitiva. Este artículo examina el impacto a largo plazo de estas intervenciones, desde la perspectiva del desarrollo urbano, la infraestructura, y la sostenibilidad.

## GRÁFICO N° 7: IMPACTO A LARGO PLAZO Y DESARROLLO URBANO

### Transformando Sucre: Un Camino hacia el Desarrollo Sostenible a través de Megaproyectos



**Fuente:** Elaboración Propia

### Desarrollo Urbano y Modernización de la Ciudad

Los megaproyectos del Bicentenario están diseñados para modernizar la infraestructura urbana, abordando problemas históricos de planificación y adaptando a Sucre a las necesidades del siglo XXI. Estos proyectos incluyen la expansión de servicios públicos, el rediseño de espacios urbanos, y la mejora del transporte.

### Expansión de Infraestructura y Servicios Básicos

Uno de los efectos más visibles de los megaproyectos será la expansión y mejora de los servicios básicos como el suministro de agua potable, saneamiento, electricidad y transporte. Esto es especialmente importante en zonas donde la infraestructura es deficiente o insuficiente para la creciente demanda de la población.

**Mejoras en el transporte público:** Se proyecta la creación de nuevas rutas de transporte público y la implementación de sistemas más eficientes, lo que reducirá la congestión vehicular y mejorará la movilidad urbana.

### Expansión de redes de saneamiento y agua potable:

La modernización de estas redes garantizará un mejor acceso a servicios esenciales para la población y disminuirá las brechas de infraestructura en áreas periféricas de la ciudad.

### Redefinición de Espacios Urbanos

El desarrollo urbano del Bicentenario también incluye la revitalización de espacios públicos, parques y plazas, proporcionando áreas de esparcimiento y fomentando la convivencia social. Esto no solo contribuye a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, sino que también fortalece el atractivo turístico de Sucre.

**Desarrollo de parques y zonas verdes:** La creación de nuevos espacios verdes y parques no solo embellece la

ciudad, sino que también tiene un impacto positivo en la salud pública y el medio ambiente. Las áreas verdes actúan como zonas de amortiguamiento para el ruido y la contaminación y ayudan a regular las temperaturas urbanas.

**Revitalización del centro histórico:** Manteniendo su carácter patrimonial, los proyectos en el casco histórico de la ciudad buscan preservar el patrimonio arquitectónico al tiempo que modernizan las instalaciones y mejoran la funcionalidad de estos espacios.

### Aumento de la Vivienda y Espacios Comerciales

Con el crecimiento urbano viene la necesidad de más viviendas y espacios comerciales. Los megaproyectos del Bicentenario incluyen desarrollos habitacionales que satisfacen la demanda de la población en crecimiento, y nuevos espacios comerciales que impulsan la actividad económica.

**Nuevas áreas residenciales:** Se están proyectando barrios modernos y sostenibles, con infraestructura básica y servicios como acceso a áreas verdes, transporte público, y centros educativos.

**Zonas comerciales y de servicios:** La creación de centros comerciales y áreas dedicadas al comercio y los servicios permitirá dinamizar la economía local, ofreciendo nuevas oportunidades de empleo e inversión.

### Impacto Económico a Largo Plazo

El impacto económico de los megaproyectos del Bicentenario no solo se verá en el corto plazo, con la generación de empleo durante su construcción, sino que tendrá efectos duraderos sobre la economía local a través del crecimiento del turismo, la atracción de inversiones y la mejora del entorno empresarial.

### Impulso al Turismo

Sucre, como ciudad histórica, tiene un gran potencial turístico que se verá fortalecido con las mejoras en su infraestructura y los nuevos desarrollos culturales y patrimoniales. Los megaproyectos incluyen la restauración y conservación de monumentos históricos, así como la construcción de nuevos centros culturales.

**Nuevas rutas turísticas:** La renovación de espacios históricos y la creación de museos, centros culturales y monumentos conmemorativos atraerán más visitantes, contribuyendo al crecimiento del sector turístico.

**Mejoras en conectividad:** La modernización del aeropuerto y las rutas terrestres facilitarán el acceso a la ciudad, incrementando el flujo de turistas nacionales e internacionales.

### Atracción de Inversiones

Con una infraestructura más moderna y eficiente, Sucre se vuelve más atractiva para inversionistas nacionales y

extranjeros. La ciudad podrá posicionarse como un hub regional de comercio, turismo y servicios.

**Inversiones en comercio y servicios:** La construcción de nuevos centros comerciales, hoteles y áreas de oficinas permitirá que Sucre capte inversiones en el sector privado.

**Incentivos fiscales:** A través de políticas de incentivos, el gobierno local podría atraer empresas a instalarse en la ciudad, beneficiándose de su infraestructura renovada y su creciente población.

### Creación de Empleo

El impacto de los megaproyectos también se sentirá en la creación de empleo, tanto durante la fase de construcción como en la operación de nuevas infraestructuras y servicios.

**Empleo en construcción y mantenimiento:** Miles de empleos se generarán en la construcción de las infraestructuras, además de oportunidades continuas en el mantenimiento de las mismas.

**Nuevas oportunidades laborales:** Con el crecimiento del sector turístico y comercial, se espera un aumento en la demanda de empleo en áreas relacionadas con el servicio al cliente, hotelería y el comercio.

### Sostenibilidad y Resiliencia a Largo Plazo

Uno de los enfoques clave en los megaproyectos del Bicentenario es la incorporación de principios de sostenibilidad y resiliencia frente al cambio climático y otros desafíos ambientales.

### Infraestructura Sostenible

La planificación de infraestructura urbana con un enfoque en la eficiencia energética y la reducción de la huella ecológica es un componente clave del desarrollo a largo plazo de Sucre. Esto incluye la integración de tecnologías de energías renovables, como la energía solar y eólica, y el uso de materiales de construcción sostenibles.

**Eficiencia energética en edificios:** Los nuevos edificios públicos y privados se diseñarán con normas de eficiencia energética, como la instalación de paneles solares y sistemas de aislamiento térmico que reduzcan el consumo de electricidad.

**Gestión de recursos hídricos:** La implementación de tecnologías para la gestión eficiente del agua, como sistemas de recolección de agua de lluvia y plantas de tratamiento de aguas residuales, garantiza un uso responsable de este recurso vital.

### Adaptación al Cambio Climático

En el contexto del cambio climático, la resiliencia de las ciudades es crucial para garantizar la seguridad

y bienestar de sus habitantes. Los megaproyectos del Bicentenario incluyen medidas para mejorar la capacidad de Sucre para resistir fenómenos climáticos extremos como sequías, inundaciones y deslizamientos de tierra.

**Proyectos de reforestación y control de erosión:** La recuperación de áreas verdes y la plantación de árboles ayudarán a mitigar los efectos del cambio climático, como la erosión del suelo y la pérdida de biodiversidad.

**Sistemas de drenaje urbano:** Se han diseñado sistemas avanzados de drenaje para gestionar el agua de lluvia y prevenir inundaciones en áreas vulnerables de la ciudad.

### Impacto Social a Largo Plazo

El impacto social de los megaproyectos será significativo, ya que mejorarán la calidad de vida de los ciudadanos, reducirán las desigualdades urbanas y promoverán un mayor acceso a servicios esenciales.

### Mejora de la Calidad de Vida

Las mejoras en infraestructura, como el acceso a transporte, servicios básicos y espacios verdes, tendrán un impacto directo en la calidad de vida de los ciudadanos, haciéndola más inclusiva y equitativa.

**Reducción de la pobreza urbana:** Al mejorar el acceso a servicios y oportunidades de empleo, los megaproyectos contribuyen a reducir las desigualdades sociales en Sucre.

**Acceso a vivienda digna:** Los nuevos desarrollos habitacionales están diseñados para ofrecer viviendas asequibles y dignas, lo que ayudará a reducir el déficit habitacional en la ciudad.

### Fomento de la Participación Ciudadana

El desarrollo de espacios públicos renovados y la creación de infraestructuras comunitarias fomentan la participación ciudadana y el fortalecimiento del tejido social. Estos espacios permiten la realización de actividades culturales, educativas y recreativas, promoviendo una mayor cohesión social.

## CONCLUSIONES

La construcción de nuevos espacios públicos en las Mega Obras del Bicentenario de la Ciudad de Sucre constituye una iniciativa crucial para revitalizar la ciudad y mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Estos proyectos no solo proporcionan áreas para el esparcimiento y la convivencia social, sino que también generan un impacto económico positivo al atraer turismo, crear empleo y fomentar el comercio local. Sin embargo, para garantizar su éxito a largo plazo, es fundamental abordar los desafíos relacionados con el mantenimiento, la seguridad y la accesibilidad. Con una planificación adecuada y una gestión responsable, los nuevos

espacios públicos del Bicentenario pueden convertirse en pilares del desarrollo urbano sostenible de la ciudad.

Las Mega Obras del Bicentenario representan una oportunidad única para transformar la Ciudad de Sucre en una urbe moderna y sostenible. Desde una perspectiva ambiental, estos proyectos tienen el potencial de mejorar la gestión de recursos naturales, reducir la contaminación y promover prácticas urbanas sostenibles. Socialmente, los megaproyectos no solo crean empleos y mejoran la infraestructura, sino que también contribuyen a una mayor equidad y calidad de vida para los ciudadanos. Es esencial, sin embargo, que el desarrollo sea inclusivo y respetuoso con el medio ambiente y las comunidades locales.

Asimismo, la construcción de edificaciones públicas y monumentos en el marco de estas obras ofrece una oportunidad para modernizar la ciudad, preservar su patrimonio histórico y fortalecer su identidad cultural. Estos proyectos no solo mejorarán la infraestructura y los servicios de Sucre, sino que también generarán espacios de reflexión histórica y convivencia social que enriquecerán la vida de sus habitantes y visitantes. La ingeniería civil desempeña un papel crucial en la creación de estas infraestructuras, asegurando que sean sostenibles, funcionales y respetuosas del entorno cultural y natural de la ciudad.

Las Mega Obras del Bicentenario están impulsando un cambio hacia una ciudad más sostenible y moderna, donde las energías renovables y las prácticas urbanas responsables son fundamentales. La integración de energía solar, eólica e hidráulica, junto con el desarrollo de infraestructuras resilientes y eficientes, posiciona a Sucre como un modelo de sostenibilidad en Bolivia. Al incorporar energías limpias en su matriz energética y promover una planificación urbana responsable, Sucre no solo conmemora su Bicentenario con orgullo, sino que también se prepara para enfrentar los desafíos del futuro.

El análisis geotécnico y la prevención de riesgos son componentes esenciales en la ejecución de las Mega Obras. La implementación de estudios geotécnicos rigurosos y la adopción de medidas preventivas no solo garantizan la seguridad y estabilidad de las infraestructuras, sino que también promueven un desarrollo urbano sostenible y resiliente. A medida que Sucre avanza hacia su futuro, es vital que la ingeniería civil y las prácticas de gestión de riesgos se integren para construir una ciudad que honre su historia mientras se adapta a los desafíos contemporáneos.

Las Mega Obras del Bicentenario de Sucre representan una oportunidad singular para transformar la infraestructura urbana y establecer las bases para un futuro sostenible. Desde la perspectiva de la ingeniería civil, estos proyectos requieren una planificación detallada, una ejecución cuidadosa y un enfoque en la sostenibilidad a largo plazo. La modernización de

la infraestructura vial, la mejora de los sistemas de saneamiento, la construcción de edificaciones públicas y el uso de energías renovables son aspectos clave que deben considerarse para asegurar que los proyectos del Bicentenario no solo celebren el pasado, sino que también construyan un futuro mejor para la ciudad.

El impacto de las Mega Obras será profundo y duradero en el desarrollo urbano, económico, social y ambiental de Sucre. La modernización de la infraestructura, la expansión de servicios básicos, la creación de empleo y la promoción de la sostenibilidad transformarán a Sucre en una ciudad más moderna, competitiva y resiliente. Esta transformación posicionará a Sucre como un ejemplo de cómo las ciudades pueden honrar su pasado mientras

se preparan para los desafíos del futuro, garantizando un desarrollo inclusivo y sostenible para las próximas generaciones.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Patrimonio y urbanismo: propuesta de estructura del Parque Bicentenario en Sucre.
- (PDF) DESARROLLO URBANO COMPLEJO: Del proyecto territorial al plan territorial para Vivir Bien | Javier Adolfo López Terrazas - Academia.edu.



INGENIUM  
INGENIUM  
INGENIUM



# Propagación del incremento de esfuerzos verticales en un suelo agrícola de Tarabuco: Esfuerzo de preconsolidación en suelos no saturados

Torrice, J.A.a, Barahona, C b, Di Emidio, G.c, Cornelis, W. d, Rojas, J.C. e, Bezuijen, A. f

- (a) Responsable Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), doctorando en Ingeniería Civil Universidad de Gante-Bélgica, Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Planta baja, Sucre, Bolivia. E-mail: JuanAlfredo.TorriceBravo@UGent.be
- (b) Doctorando de Universidad de Gante, Departamento de Ingeniería Civil. E-mail: christianbarahona07@outlook.com.
- (c) Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de Ingeniería Civil. E-mail: Gemina.DiEmidio@ugent.be.
- (d) Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de Biociencias, Universidad de Gante. E-mail: Wim.Cornelis@ugent.be.
- (e) Docente titular de la carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: geotecnia@gmail.com.
- (f) Director del laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Gante, Universidad de Gante. E-mail: Adam.Bezuijen@ugent.be.

Recibido: 03/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Publicado: 10/11/2024

## RESUMEN

El presente artículo evalúa el riesgo de compactación debido al paso de maquinaria agrícola por un perfil de suelo no saturado a través del concepto de esfuerzo de preconsolidación, que es la frontera entre el estado elástico y plástico de un suelo. Para el cálculo del esfuerzo de preconsolidación, se han realizado simulaciones con el software TERRANIMO y ensayos de consolidación unidimensionales con un equipo triaxial de suelos no saturados. El sitio de experimentación ha consistido de dos terrenos agrícolas ubicados en la localidad de Tarabuco, ambos constituidos en su perfil estratigráfico por un suelo limo arenoso (ML). El tractor agrícola es un modelo John Deere 6110D, con una presión de inflado aplicada a los neumáticos de 83 kPa. Para realizar la medición de la succión matricial se han empleado tensiómetros de campo (modelo Red Fill) a una profundidad de 0.30 m. Con los resultados que se han obtenido se ha concluido que los dos terrenos de experimentación no alcanzan su estado plástico y no existe riesgo de compactación con las condiciones de presión de inflado impuestas, las simulaciones y los ensayos de laboratorio del esfuerzo de preconsolidación han presentado correlaciones de 1.69 % y 10.72 %. Finalmente, se ha encontrado que un incremento de 10 kPa en la succión matricial ha generado un incremento del 7% del esfuerzo de preconsolidación.

**Palabras clave:** Esfuerzo de Preconsolidación, succión matricial, Terranimo, tensiómetro Red Fill.

## ABSTRACT

The present paper assess the risk of soil compaction through an unsaturated profile due to the passage of agricultural machinery following the concept of precompression stress, which is the threshold between the elastic and plastic state of a unsaturated soil. In order to calculate the precompression stress, simulations have been carried out with the TERRANIMO software; and laboratory one-dimensional consolidation tests, with a unsaturated soils triaxial apparatus. The experimental site consisted by two agricultural places located in Tarabuco, both constituted in their stratigraphic profile by a sandy silt soil (ML). The tractor is a John Deere model 6110D, employing an inflation pressure of 83 kPa to the both tires. For the measurements of matric suction, it was employed Tensiometers (Red Fill type) at a depth of 0.30 m. With the results obtained, it has been concluded that the two experimental fields do not reach their plastic state and there is no risk of soil compaction with the imposed inflation pressure conditions, simulations and laboratory tests of the precompression stress provided correlations of 1.69 % and 10.72 %. Finally, it has been found that an increase of 10 kPa in matric suction generated a 7% on the increase in precompression stress.

**Key words:** Precompression stress, Matric suction, Terranimo software, Red Fill Tensiometers.

## INTRODUCCIÓN

El esfuerzo de preconsolidación (P.C.S.) es comúnmente usado como un indicador de la capacidad de carga de un suelo y del historial de esfuerzos del mismo (De Pue, 2019).

También, el esfuerzo de Preconsolidación es considerado como un límite teórico de esfuerzos, en el cual la deformación de un suelo pasa de un comportamiento elástico a uno plástico. Es típicamente determinado a partir de una relación esfuerzo-deformación logarítmica en un ensayo de compresión uniaxial (Edómetro). Originalmente, este método fue desarrollado para aplicaciones geomecánicas en suelos saturados y largos tiempos de carga para resolver problemas de fundaciones y estabilidad de taludes; sin embargo, se ha demostrado que también es posible aplicar este esfuerzo de preconsolidación a la mecánica de suelos saturados (Horn, 1981).

El cálculo del esfuerzo de preconsolidación fue originalmente propuesto por Casagrande en el año 1936. El método de Casagrande es una solución gráfica que encuentra la intersección entre la línea bisectriz entre el punto de máxima curvatura y la línea de compresión virgen (V.C.L., i.e. la línea que se encuentra en la parte plástica de la curva esfuerzo deformación del suelo). A partir de la solución de Casagrande, diversos métodos automatizados han sido desarrollados (Dawidowski y Koolen, 1994; Baumgartl y Köck, 2004; Rücknagel et al., 2010) y varias soluciones alternativas, basadas en regresión lineal, han sido propuestas (Schmertmann, 1955; McBride and Joosse, 1996; Junior and Pierce, 1995).

La proliferación de métodos de cálculo del esfuerzo de preconsolidación ilustra la falta de consenso en cuanto a la interpretación de su resultado. Esa falta de estandarización en cuanto a su cálculo infravalora la usabilidad del P.C.S. (Keller et al., 2011). En general, el esfuerzo de preconsolidación muestra una alta variabilidad en muchos casos. Esto es mayormente atribuible a la heterogeneidad de las muestras (Baumgartl y Köck, 2004; Cavalieri et al., 2008), sin embargo la robustez de los métodos de cálculo del P.C.S. es una pregunta abierta.

Actualmente, está vigente la norma ASTM D2435, la cual está enfocada en el procedimiento experimental del ensayo y la obtención de la curva edométrica, que es una curva logarítmica que relaciona el esfuerzo normal y la relación de vacíos. Esta norma, si bien habla del método de Casagrande, no normaliza el cálculo del esfuerzo de preconsolidación.

Para el cálculo del esfuerzo de preconsolidación en suelos no saturados, se tiene que incluir una variable adicional, que es la succión matricial; en este sentido, la

utilización del equipo tradicional para suelos saturados (edómetro) no es viable porque no maneja esta variable.

El objetivo del presente trabajo de investigación es el de verificar si el suelo analizado ha experimentado daño por compactación o ha ingresado a su estado plástico mediante el concepto de Esfuerzo de Preconsolidación (P.C.S.). Para ello se van a realizar dos simulaciones de ensayo de preconsolidación en dos terrenos de estudio denominados "S1" y "S2", debido al paso de maquinaria sobre un suelo agrícola en la localidad de Tarabuco, con el software TERRANIMO. También se van a realizar dos ensayos de preconsolidación en suelos no saturados, a predeterminados valores de succión matricial en los mismos terrenos de estudio "S1" y "S2", pero de forma experimental utilizando un equipo triaxial de suelos no saturados. Con los resultados obtenidos, se van a realizar análisis comparativos entre los resultados experimentales y los resultados de simulación (software TERRANIMO) para evaluar su correlación; asimismo, se va a analizar el efecto de la succión matricial en los resultados obtenidos de esfuerzo de preconsolidación y finalmente, se va a comprobar si los ensayos de campo con la maquinaria empleada, han provocado que los suelos "S1" y "S2" ingresen a un estado plástico o sufran daño por compactación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de experimentación y condiciones no saturadas

La figura 1 muestra una vista en planta de los dos terrenos de estudio S1, S2. Para una mayor explicación se pide recurrir al artículo de la anterior edición de la revista, mismo autor.



**Figura 1.** Ubicación de los terrenos de estudio (círculo amarillo S1, rojo S2).

La tabla 1 es un resumen de la caracterización. Se trata de un suelo agrícola limo arenoso de baja plasticidad (ML), de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

**Tabla 1.** Caracterización del suelo.

Suelo	Arcilla %	Limo %	Arena %	$g_{KN/m^3}$	$G_s$	SUCS	Cont. Orgánico %
S1	8	48	44	17,0	2,64	ML	0,52
S2	10	52	38	17,2	2,65	ML	0,45

La presente investigación estudia el esfuerzo de preconsolidación en suelos no saturados; entonces para las simulaciones y los ensayos experimentales se requiere el valor de la succión matricial que se ha de manejar en ambos. La tabla 2 muestra esta variable, así como la profundidad:

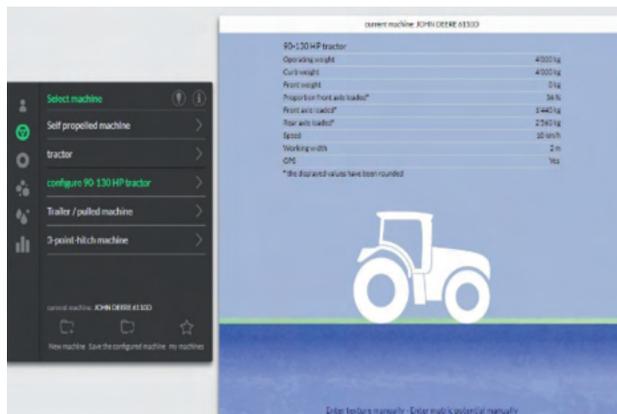
**Tabla 2.** Succión matricial

Suelo	Profundidad m	Succión Matricial kPa	Observación
S1	0.30	36	Succión registrada en el ensayo de campo
S2	0.30	46	Succión registrada en el ensayo de campo

Los valores de succión matricial registrados en la tabla 2 corresponden a las mediciones en campo realizadas con los tensiómetros red fill en el momento de los ensayos (Torrico, 2023).

### Simulación del esfuerzo de Preconsolidación software TERRANIMO

Terranimo es un software de acceso libre que se encuentra en la web ([www.terranimoworld.com](http://www.terranimoworld.com)), el cual evalúa el riesgo de compactación del suelo debido al paso de maquinaria agrícola. El software utiliza como datos de entrada a la textura del suelo analizado, su contenido orgánico, densidad aparente y succión matricial a diversas profundidades (Torrico et. al., 2022). Es necesario hacer notar que para la presente investigación se ha simulado en el software las condiciones normales de presión de inflado, es decir 83 kPa para el neumático delantero y trasero del tractor Agrícola John Deere 6110 D como se muestra en la figura 2 (Torrico et. al., 2023).



**Figura 2.** Interfaz del software Terranimo

### Determinación experimental del esfuerzo de preconsolidación en laboratorio



**Figura 3.** Equipo triaxial de suelos no saturados

Al tratarse de un estudio experimental en suelos no saturados, se ha desechado el uso del edómetro convencional y se ha empleado un equipo triaxial de suelos no saturados (Figura 3) teniendo cuidado de realizar una ecualización de la succión matricial deseada para los dos ensayos y simular las condiciones de presión confinante a la que está sujeto el suelo antes del paso de la maquinaria.

### Procedimiento de la simulación en el software TERRANIMO

Como se ha explicado, el software ha sido introducido con datos de entrada correspondientes de las Tablas 1 y 2, adicionalmente a esos datos se ha requerido información de las presiones de inflado de los neumáticos (Tabla 3). Se hace notar que en el presente trabajo de investigación solamente se han empleado las condiciones de presión de inflado recomendada de la Tabla 3, es decir 83 kPa para el neumático delantero y 83 kPa para el neumático trasero.

**Tabla 3.** Variación de la presión de inflado

#### Presiones de inflado utilizadas

Tipo de Neumático	recomendada (KPa)	intermedia (KPa)	máxima (KPa)
13.6R24	83	138	193
18.4R34	83	110	138

### Procedimiento de los ensayos de Esfuerzo de preconsolidación

A diferencia de los procedimientos de la norma ASTM D2435 que regula un ensayo de preconsolidación en suelos saturados, en el presente trabajo de investigación se han utilizado dos muestras de suelos no saturados de 38 mm de diámetro y altura 76 mm, las que previamente

se han ecualizado para alcanzar las succiones matriciales de campo registradas de 36 kPa, en el caso del suelo S1, y 46 kPa, en el caso del suelo S2. Posteriormente a la ecualización, cada muestra ha sido sujeta a incrementos de carga de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, y 500 kPa con una diferencia de 24 horas cada uno. La deformación ha sido medida con un sensor de desplazamiento con una sensibilidad de  $1 \times 10^{-6}$  m. Simultáneamente, el esfuerzo ha sido medido con una célula de carga.

## RESULTADOS

### Simulaciones del esfuerzo de preconsolidación con el Software Terranimo

A continuación, se muestran los resultados de la simulación en el software TERRANIMO con las condiciones impuestas de presión de inflado recomendada; en la Figura 4 para el caso del ensayo con el suelo S1, y en la Figura 5 para el caso del Ensayo con el suelo S2.

Para el suelo S1, en la figura 4 se muestran varios resultados. Para el presente trabajo de investigación interesa la columna "Soil strength", la cual para el software TERRANIMO corresponde al Esfuerzo de Preconsolidación. También interesa la columna "Depth", que es la profundidad y dentro de este parámetros la profundidad a analizar es de 30 cm como se ha indicado en la Tabla 2. Para estas condiciones, el esfuerzo de preconsolidación obtenido que se ha simulado con el software es de 2.62 Bar que equivale a 262 kPa, valor que se utilizará para comparar con los resultados experimentales de laboratorio.

Depth (cm)	Soil Strength (bar)	Soil stress-Left front wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Right front wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Left rear wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Right rear wheel 90-130 HP tractor (bar)	Clay content in the soil (%)	Matric potential in the soil (cbar)
0cm	2,69	1,56	1,56	1,44	1,44	8	38
5cm	2,69	1,28	1,28	1,27	1,27	8	38
10cm	2,69	0,99	0,99	1,11	1,11	8	38
15cm	2,69	0,77	0,77	0,94	0,94	8	38
20cm	2,69	0,59	0,59	0,77	0,77	8	38
25cm	2,62	0,45	0,45	0,64	0,64	8	36
30cm	2,62	0,36	0,36	0,52	0,52	8	36
35cm	2,48	0,29	0,29	0,43	0,43	8	33
40cm	2,48	0,23	0,23	0,36	0,36	8	33
45cm	2,36	0,19	0,19	0,3	0,3	8	30
50cm	2,36	0,16	0,16	0,26	0,26	8	30
55cm	2,36	0,14	0,14	0,22	0,22	8	30
60cm	2,36	0,12	0,12	0,19	0,19	8	30
65cm	2,36	0,1	0,1	0,17	0,17	8	30
70cm	2,36	0,09	0,09	0,15	0,15	8	30
75cm	2,36	0,08	0,08	0,13	0,13	8	30
80cm	2,36	0,07	0,07	0,12	0,12	8	30
85cm	2,36	0,06	0,06	0,1	0,1	8	30
90cm	2,36	0,05	0,05	0,09	0,09	8	30
95cm	2,36	0,05	0,05	0,09	0,09	8	30
100cm	2,36	0,04	0,04	0,08	0,08	8	30

**Figura 4.** Suelo S1, simulación del Esfuerzo de Preconsolidación en TERRANIMO.

Para el suelo S2, en la figura 5, tal cual como en el suelo S1, se muestran varios resultados. Para el presente trabajo de investigación interesa la columna "Soil strength", la cual para el software TERRANIMO corresponde al Esfuerzo de Preconsolidación. También interesa la columna "Depth", que es la profundidad y dentro de este parámetros la profundidad a analizar es de 30 cm como se ha indicado en la Tabla 2 del presente trabajo de investigación. Para estas condiciones, el esfuerzo de preconsolidación obtenido que se ha simulado con el software es de 3.16 Bar que equivale a 316 kPa, valor que se utilizará para comparar con los resultados experimentales de laboratorio.

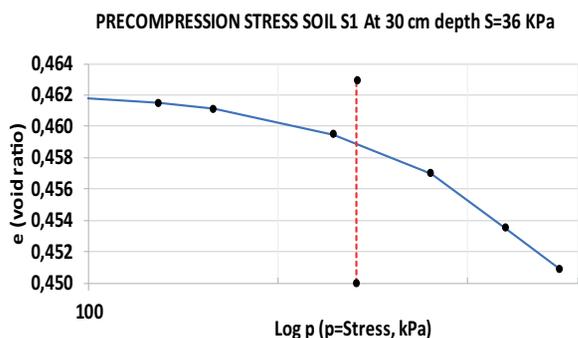
Depth (cm)	Soil Strength (bar)	Soil stress-Left front wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Right front wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Left rear wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Right rear wheel 90-130 HP tractor (bar)	Clay content in the soil (%)	Matric potential in the soil (cbar)
0cm	3,23	1,61	1,61	1,48	1,48	10	48
5cm	3,23	1,3	1,3	1,31	1,31	10	48
10cm	3,23	1	1	1,13	1,13	10	48
15cm	3,23	0,76	0,76	0,94	0,94	10	48
20cm	3,23	0,58	0,58	0,77	0,77	10	48
25cm	3,16	0,45	0,45	0,63	0,63	10	46
30cm	3,16	0,35	0,35	0,52	0,52	10	46
35cm	3,05	0,28	0,28	0,42	0,42	10	43
40cm	3,05	0,23	0,23	0,35	0,35	10	43
45cm	2,94	0,19	0,19	0,3	0,3	10	40
50cm	2,94	0,16	0,16	0,25	0,25	10	40
55cm	2,94	0,13	0,13	0,22	0,22	10	40
60cm	2,94	0,11	0,11	0,19	0,19	10	40
65cm	2,94	0,1	0,1	0,16	0,16	10	40
70cm	2,94	0,08	0,08	0,14	0,14	10	40
75cm	2,94	0,07	0,07	0,13	0,13	10	40
80cm	2,94	0,07	0,07	0,11	0,11	10	40
85cm	2,94	0,06	0,06	0,1	0,1	10	40
90cm	2,94	0,05	0,05	0,09	0,09	10	40
95cm	2,94	0,05	0,05	0,08	0,08	10	40
100cm	2,94	0,04	0,04	0,07	0,07	10	40

**Figura 5.** Suelo S2, simulación del Esfuerzo de Preconsolidación en TERRANIMO.

### Ensayo de Esfuerzo de Preconsolidación en laboratorio

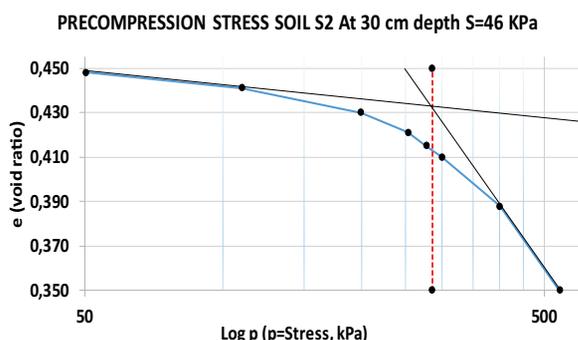
A continuación, en las figuras 6 y 7, se muestran las curvas de consolidación de los suelos analizados S1 y S2, respectivamente.

El método utilizado en el presente trabajo de investigación es el de Junior an Pierce (1995). La tesis de doctorado de Jan De Pue (2019) concluye que uno de los métodos de cálculo más recomendados para calcular el esfuerzo de Preconsolidación es el de Junior and Pierce.



**Figura 6.** Suelo S1, Ensayo de laboratorio del Esfuerzo de Preconsolidación a una succión matricial de 36 kPa a 0.30 m de profundidad.

Como se observa en la figura 6, el esfuerzo de preconsolidación obtenido para el suelo S1 es de 266.50 kPa, que comparado con el obtenido en la simulación (Figura 4) de 262 kPa, no difiere mucho (4.5 kPa de diferencia).



**Figura 7.** Suelo S2, Ensayo de laboratorio del Esfuerzo de Preconsolidación a una succión matricial de 46 kPa a 0.30 m de profundidad.

La figura 7 muestra el ensayo de preconsolidación para el suelo S2 a una succión matricial de 46 kPa y una profundidad de 0.30 m. Para este suelo se ha obtenido un esfuerzo de Preconsolidación de 285.40 kPa, el cual comparado con el esfuerzo obtenido en la simulación (316 kPa) difiere un poco más que en el suelo S1 (30.6 kPa)

**Análisis comparativo del esfuerzo de Preconsolidación: Simulación y ensayo de laboratorio**

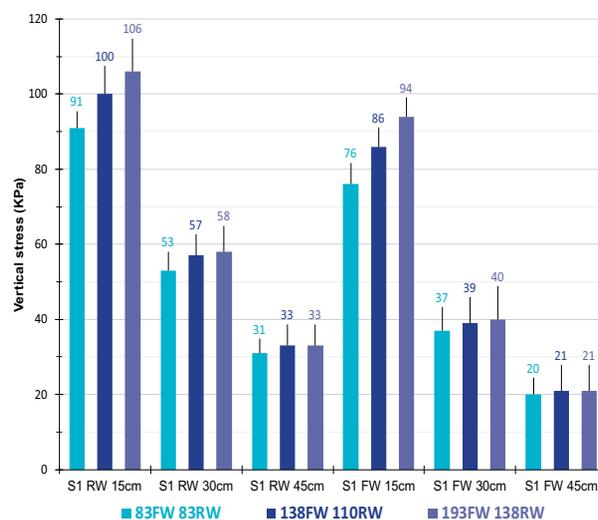
**Tabla 4.** P.C.S.: Comparación de resultados

Suelo	Esfuerzo de Preconsolidación		%
	Simulación TERRANIMO (KPa)	Ensayo Laboratorio (KPa)	
S1	262.00	266.50	1.69
S2	316.00	285.40	10.72

La tabla 4 muestra los resultados obtenidos de simulación, con el software TERRANIMO, y laboratorio, con el equipo triaxial de suelos no saturados, de los dos ensayos realizados. Haciendo un análisis comparativo, en el caso del suelo S1 los resultados de simulación del esfuerzo de preconsolidación están subestimados en un 1.69% respecto a los ensayos de laboratorio. En el caso del suelo S2, los resultados de esfuerzo de preconsolidación de las simulaciones en el software TERRANIMO están sobreestimados en un 10.72 % respecto a los ensayos de laboratorio.

Se hace notar que, en ningún caso la variación de resultados supera el 11%, entre simulaciones y ensayos de laboratorio.

**Verificación si existe daño en el suelo (estado plástico)**



**Figura 8.** Suelo S1, variación de los esfuerzos verticales generados en los ensayos de campo.

Como se indicó en la introducción del presente estudio, el esfuerzo de preconsolidación es el límite entre el estado elástico y plástico de un suelo. En el caso de la presente investigación, esto resulta de gran importancia para saber si el paso de la maquinaria agrícola sobre los suelos S1 y S2 en los ensayos de campo, ha ocasionado que los esfuerzos en estos perfiles de suelo hayan ingresado en estado plástico. Para verificar esto, se utilizarán los resultados de la Tabla 4 y los resultados de los ensayos de campo en la localidad de Tarabuco que se muestran a continuación en las Figuras 8 y 9.

En la figura 8, que corresponde al suelo S1, si bien sólo interesan para la presente investigación los resultados correspondientes a la presión de inflado recomendada a la profundidad de 0.30 m (barras de color azul del sector S1 RW 30cm y S1 FW 30cm), se puede observar que los máximos esfuerzos verticales alcanzados con el paso de la maquinaria no superan el esfuerzo de preconsolidación obtenido en las simulaciones o los

ensayos de laboratorio, de modo que se confirma que el suelo S1 no ha ingresado a un estado plástico en ningún momento de los ensayos de campo. Para una mejor aclaración de lo que se menciona, se muestra la siguiente Tabla 5 en la que se extraen los resultados de la tabla 4 y la figura 8 para verificar que el suelo S1 no ingresa a un estado plástico.

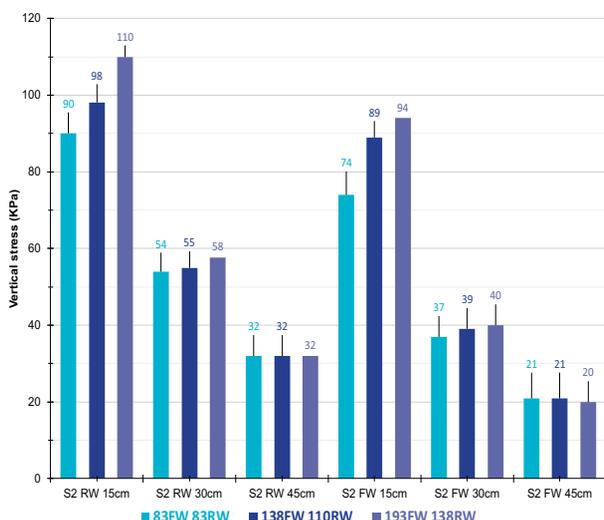
**Tabla 5.** P.C.S. suelo S1: Comparación de resultados

Esfuerzo de Preconsolidación			
Suelo	Simulación TERRANIMO (KPa)	Ensayo Laboratorio (KPa)	Esfuerzo máximo ensayo de campo (KPa)
S1	262.00	266.50	53

El esfuerzo normal máximo de 53 kPa se ha obtenido de la figura 8 y corresponde al suelo S1, a la profundidad de 0.30 m y al neumático trasero para las condiciones de presión de inflado “recomendada”.

La tabla 5 muestra que esos 53 kPa son inferiores a los esfuerzos de preconsolidación, tanto los simulados con el software TERRANIMO como los obtenidos en laboratorio, de modo que no existe daño en el suelo por el paso de la maquinaria y además está muy lejos de ingresar a su estado plástico.

En la figura 9, que corresponde al suelo S2, si bien sólo interesan para la presente investigación los resultados correspondientes a la presión de inflado recomendada a la profundidad de 0.30 m (barras de color azul del sector S2 RW 30cm y S2 FW 30cm), se puede observar de toda la figura que los máximos esfuerzos verticales alcanzados con el paso de la maquinaria no superan el esfuerzo de preconsolidación obtenido en las simulaciones o los ensayos de laboratorio, de modo que se confirma que el suelo S2 no ha ingresado a un estado plástico en ningún momento de los ensayos de campo.



**Figura 9.** Suelo S2, variación de los esfuerzos verticales generados en los ensayos de campo.

Para una mejor aclaración de lo que se menciona, se muestra la siguiente Tabla 6 en la que se extraen los resultados de la tabla 4 y la figura 9 para verificar que el suelo S2 no ingresa a un estado plástico.

**Tabla 6.** P.C.S. suelo S2: Comparación de resultados

Esfuerzo de Preconsolidación			
Suelo	Simulación TERRANIMO (KPa)	Ensayo Laboratorio (KPa)	Esfuerzo máximo ensayo de campo (KPa)
S2	316	285.40	54

El esfuerzo normal máximo de 54 kPa se ha obtenido de la figura 9 y corresponde al suelo S2, a la profundidad de 0.30 m y al neumático trasero para las condiciones de presión de inflado “recomendada”.

La tabla 6 muestra que esos 54 kPa son inferiores a los esfuerzos de preconsolidación, tanto los simulados con el software TERRANIMO como los obtenidos en laboratorio, de modo que no existe daño en el suelo por el paso de la maquinaria y además está muy lejos de ingresar a su estado plástico.

### Efecto de la succión matricial en el esfuerzo de preconsolidación

Para interpretar el efecto de la succión matricial en el esfuerzo de preconsolidación obtenido en los ensayos de laboratorio y simulaciones con el software TERRANIMO, se ha conformado la siguiente tabla 7

**Tabla 7.** Succión Matricial en el esfuerzo de preconsolidación.

Esfuerzo de Preconsolidación			
Suelo	Simulación TERRANIMO (KPa)	Ensayo Laboratorio (KPa)	Succión Matricial (KPa)
S1	262.00	266.50	36
S2	316.00	285.40	46

La tabla 7 muestra claramente en ambos ensayos que un aumento en la succión matricial, que en este caso de estudio ha sido de 10 kPa, ha generado un aumento del esfuerzo de preconsolidación, 54 kPa en el caso de las simulaciones, y 18.9 kPa en el caso de los ensayos de laboratorio. Tomando como base los resultados de laboratorio, representa un incremento del 7 % del esfuerzo de preconsolidación. En ambos casos, el incremento de la succión matricial ha generado un incremento en el esfuerzo de consolidación.

## CONCLUSIONES

La presente investigación concluye que los suelos analizados "S1" y "S2" no ingresan a su estado plástico y por lo tanto no sufren daño por compactación. Los esfuerzos máximos generados por el paso de la maquinaria, 53 kPa en el caso del suelo S1 y 54 kPa en el caso del suelo S2, están muy por debajo de los esfuerzos de preconsolidación obtenidos, 266.50 kPa en el caso del suelo S1 y 312.00 kPa en el caso del suelo S2, lo que nos permite concluir que no hay daño.

Existe una correlación entre los resultados obtenidos del esfuerzo de preconsolidación; de simulación con el software TERRANIMO y experimental con los ensayos de laboratorio realizados con el equipo triaxial de suelos no saturados. Si bien la correlación es más ajustada en el caso del suelo S1 (1.69 %), en el caso del suelo S2 no deja de ser aceptable (10.72 %).

Para la presente investigación el efecto de la succión matricial es notorio en el esfuerzo de preconsolidación en el sentido de que un incremento de 10 kPa de la succión matricial ha generado un incremento del 7 % en el esfuerzo de preconsolidación. Los ensayos de campo del suelo S1 han sido conducidos con un valor de succión de 36 kPa y los ensayos de campo del suelo S2 han sido conducidos bajo un valor de succión de 46 kPa.

El presente trabajo de investigación está enfocado en los suelos agrícolas de Tarabuco, sin embargo, este tiene una gran aplicación en el campo de la ingeniería civil en el sentido que la succión matricial se considera como una medición indirecta de la resistencia a la tracción del suelo, y es un aporte más para comprender la capacidad del suelo para mantener esfuerzos de tracción sin perder su estabilidad, en especial en el momento de la acción de cargas externas. Con la comprensión de este fenómeno es posible diseñar y construir estructuras, en todas las áreas de la ingeniería civil, que van a poder soportar condiciones ambientales variables en su etapa de operación, conllevando a ser una herramienta más para la ejecución de proyectos civiles más seguros y sostenibles.

Para futuras investigaciones, de acuerdo con el diseño experimental de nuestro estudio de doctorado, se tiene planificado realizar la modelación de los estudios de campo conducidos en el presente trabajo, pero ahora utilizando el software PLAXIS 2D. Para conducir esta actividad, previamente se realizarán estudios de laboratorio con el equipo triaxial de suelos no saturados para determinar el módulo elástico del suelo analizado y también su coeficiente de poisson, pues estas propiedades mecánicas del suelo son parámetros de entrada que este software avanzado requiere.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación ha sido financiado por la cooperación internacional VLIR-UOS (Consejo Flamenco de Interuniversidades para la cooperación y el desarrollo). Agradecemos a VLIR-UOS por el financiamiento bajo el proyecto de investigación VLIR ZEIN2016PR416-75155. El terreno para realizar los ensayos, así como el tractor agrícola utilizado en los ensayos con las células de carga, han sido gentilmente facilitados por la Honorable Alcaldía del Municipio de Tarabuco.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- De Pue, J., (2019). Advances in modelling vehicle-induced stress transmission in relation to soil compaction. Ghent University. PhD Thesis. **ISBN 978-94-6357-249-1**
- Torrico, J.A., Di Emidio, G., Cornellis, W., Rojas, J.C., & Bezuijen, A. (2023). Propagación del incremento de esfuerzos verticales en un suelo agrícola de Tarabuco: Efecto de la succión matricial y análisis comparativo. **4**. 23-38.
- Hartge, K. H. & Horn, R. (2016). Essential Soil Physics 1<sup>st</sup> Edition. Gulde-Druck GmbH & Co. KG. **ISBN 978-3-510-65289-1**.
- Torrico, J.A., Di Emidio, G., Cornellis, W., Rojas, J.C., & Bezuijen, A. (2022). Efecto de la presión de los neumáticos en la distribución de esfuerzos verticales generados por el paso de un tractor en un perfil limo arenoso. **3**, 37-45. **ISSN 2709-7048**.
- Lamandé, M., and Schjffning, P. (2011). Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part I: Site description, evaluation of the Söhne model, and the effect of topsoil tillage. *Soil Till. Res.* **114**, 57-70, doi: 10.1016/j.still.2011.05.004.
- Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaet, P., Keller, T., Mounkholm, L., and Lamandé, M. (2019). The contribution of the tyre evolution to the reduction of soil compaction risks. *Soil Till. Res.* **194**, 104283, doi: 10.1016/j.still.2019.05.029.
- DEERE & COMPANY. (2008). Manual del operador tractors 6100D, 6110D, 6115D, 6125D, 6130D y 6140D Edición H8 (español). Industrias John Deere S.A. de C.V. **A John Deere ILLUSTRATION Manual**.
- FIRESTONE AGRICULTURAL & TRACTOR TIRES. (2020). Load and inflation. **FirestoneAg.com**.
- Torrico, J.A., Miranda, S., Cornellis, W., Rojas, J.C., Di Emidio, G., & Bezuijen, A. (2021). Matric suction effect on distribution of stresses caused by vehicle wheels on a bare silty sand. *PanAm-Unsat 2021: 3<sup>rd</sup> Pan-American*

- Conference on Unsaturated Soils. **337**, 03004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133703004>
- Torrico, J.A., Miranda, S., Cornellis, W., Rojas, J.C., Di Emidio, G., & Bezuijen, A. (2020). Medición del incremento de esfuerzos verticales generados por un vehículo en una arena limosa. *Ingenium*. **1**, 123-128.
  - López, R. (2020). Prevention of soil compaction by agricultural operations: a geotechnical perspective. Master Thesis. **Ghent University**, Faculty of Engineering and Architecture. Ghent, Belgium.
  - Söhne, W. (1958). Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres. *Agricultural Engineering*. **39**, 276-281 290.
  - Torrico, J.A., Miranda, S., Cornellis, W., Rojas, J.C., Di Emidio, G., & Bezuijen, A. (2021). Efecto de la succión matricial en la distribución de esfuerzos verticales generados por el paso de un vehículo en una arena limosa bajo diferentes condiciones ambientales. *Ingenium*. **2**, 15-21.
  - Lamandé, M., Keller, T., Berisso, F., Stettler, M., and Schjfnning, P. (2015). Accuracy of soil stress measurements as affected by transducer dimensions and shape. *Soil Till. Res*. **145**, 72-77, doi: [10.1016/j.still.2014.08.011](https://doi.org/10.1016/j.still.2014.08.011).



# INGENIUM INGENIUM INGENIUM



# Determinación del Coeficiente de Dilatación Térmica en Concreto Hidráulico

Rodríguez, A.a, Conde, R.b; Mafaile, V.b; Mamani, Y.b; Orgaz, O.b; Pallares, E.b; Sarcillo, W.b; Vargas, G.b

- (a) Investigador en el área de ingeniería vial, Instituto de Transporte y vías de Comunicación de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Zona Q'ara Punku Laboratorios de la facultad de Ingeniería, Sucre, Bolivia. E-mail: rodriguez.abel@usfx.bo.
- (b) Estudiantes de la materia de Modelación en Ingeniería Vial CIV-348, mención vías de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia.

Recibido: 03/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Publicado: 10/11/2024

## RESUMEN

La Variación térmica produce en los cuerpos una dilatación o contracción en sus dimensiones, en el caso específico de los concretos hidráulicos, al ser el elemento que más se usa en la obra civil, se realizó una campaña con la elaboración de especímenes de diferentes tipos de mezclas en cuanto se refiera a su resistencia (empleando siempre el mismo tipo de cemento Fancesa IP-40, agregado grueso y fino procedente del río Pilcomayo, comunidad El Puente). El objetivo fue determinar un valor lo más cercano posible a las condiciones locales de nuestro departamento, mediante la medición de temperaturas vs. Variación de longitud de 54 unidades de muestras. Se logró determinar el coeficiente térmico para cada resistencia y edad, así también, se evaluó mediante promedios para cada resistencia indiferentemente de sus edades.

Los resultados obtenidos, se enmarcan dentro de los valores estimados en varias normas internacionales, lo que avala el trabajo desarrollado.

**Palabras clave:** Dilatación térmica, modelo matemático del coeficiente de dilatación térmica. Variación de dimensiones en el concreto por temperatura.

## ABSTRACT

The thermal variation produces in the bodies an expansion or contraction in their dimensions, in the specific case of hydraulic concretes, being the element that is most used in civil works, a campaign was carried out with the elaboration of specimens of different types of mixtures as far as their resistance is referred to (always using the same type of Fancesa IP-40 cement, coarse and fine aggregate from the Pilcomayo River, El Puente community). The objective was to determine a value as close as possible to the local conditions of our department, by measuring temperatures vs. Length variation of 54 sample units. It was possible to determine the thermal coefficient for each resistance and age, as well as it was evaluated by means of averages for each resistance regardless of their ages.

The results obtained are framed within the values estimated in several international standards, which endorses the work carried out.

Finally, highlight the existence of two Regulations: Bolivian Construction Regulations and the Regulations for the Development of Economic Activities in the Construction Sector, as well as the Bolivian Guide to the Construction of Buildings.

**Key words:** Thermal expansion, mathematical model of the coefficient of thermal expansion. Variation of dimensions in concrete by temperature.

## INTRODUCCIÓN

El hormigón como material se expandirá y contraerá cuando se exponga a cambios de temperatura y, cuando esto no se tenga en cuenta en el diseño, se producirá grietas en el elemento de hormigón. El coeficiente de expansión térmica del hormigón depende en gran medida del agregado, pero se puede utilizar un valor conservador de  $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  en ausencia de datos en el Reino Unido. El Euro código establece un valor de  $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , pero se considera que este valor no es conservador. El rango del coeficiente de expansión térmica del hormigón oscila entre  $7$  y  $13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

Factores como el contenido de material cementoso, la relación agua-cemento, el rango de temperatura, la edad del concreto y la humedad relativa ambiental también pueden influir en las propiedades térmicas del concreto. Sin embargo, la naturaleza de los agregados es el factor principal para determinar el coeficiente de expansión térmica y la resistencia del concreto al fuego, ya que constituyen alrededor del 70% del concreto.

No existe un método estándar para medir el coeficiente de expansión térmica del hormigón en CEN, ISO o ASTM, aunque en BS EN 1770 se proporciona un método para materiales de reparación. Sin embargo, se pueden utilizar métodos internos para la medición en laboratorio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del trabajo se empleó materiales de uso local, como ser los agregados del río Pilcomayo de la comunidad de El Puente, camino y límite departamental entre Chuquisaca y Potosí, del cual se realizó su caracterización y verificación de sus propiedades mecánicas como ser los pesos unitarios, peso específico, granulometrías, abrasión y coeficiente de uniformidad. De acuerdo al siguiente detalle:

### CEMENTO TIPO IP-40 FANCESA

PESO ESPECÍFICO	3.04 g/cm <sup>3</sup>
peso de bolsa	50 kg

### AGREGADO FINO

PESO UNITARIO SUELTO SECO	1671 Kg/m <sup>3</sup>
PESO UNITARIO COMPACTO SECO	1805 Kg/m <sup>3</sup>
PESO ESPECÍFICO	2.59 g/cm <sup>3</sup>
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	0.98%
MÓDULO DE FINEZA	2.2

### AGREGADO GRUESO

PESO UNITARIO SUELTO SECO	1272 Kg/m <sup>3</sup>
PESO UNITARIO COMPACTO SECO	1667 Kg/m <sup>3</sup>
PESO ESPECÍFICO	2.70 g/cm <sup>3</sup>
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	0.00%
T.M.N.	3/4"

La principal variable independiente, es la resistencia y las edades de los especímenes de hormigón, se consideró 9 diferentes resistencias, inicialmente las de:

### EDAD DE ENSAYO

RESISTENCIA DE DISEÑO (Kg/cm <sup>2</sup> )	14 DÍAS	28 DÍAS	OBSERVACIONES
160	3	3	3 muestras para cada ensayo, es decir 3 por variable
180	3	3	
210	3	3	
250	3	3	
300	3	3	
350	3	3	

### EDAD DE ENSAYO

CONTENIDO DE CEMENTO (Kg/m <sup>3</sup> )	14 DIAS	28 DÍAS	OBSERVACIONES
300	3	3	Equivale a 168 Kg/cm <sup>2</sup>
350	3	3	Equivale a 216 Kg/cm <sup>2</sup>
400	3	3	Equivale a 274 Kg/cm <sup>2</sup>

El desarrollo del trabajo fue en instalaciones de los laboratorios de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca.

El coeficiente de dilatación térmica ( $\alpha$ ) es una propiedad característica de los materiales que indica cuánto se expande o contrae un material por unidad de longitud por cada grado de cambio de temperatura. Matemáticamente, se expresa como:

La toma de datos de variación en su dimensión longitudinal y toma de temperatura, se muestra en la siguiente imagen:



Imagen1. Toma de datos

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la determinación del coeficiente de Dilatación térmica del concreto hidráulico, se resumen en el siguiente gráfico.

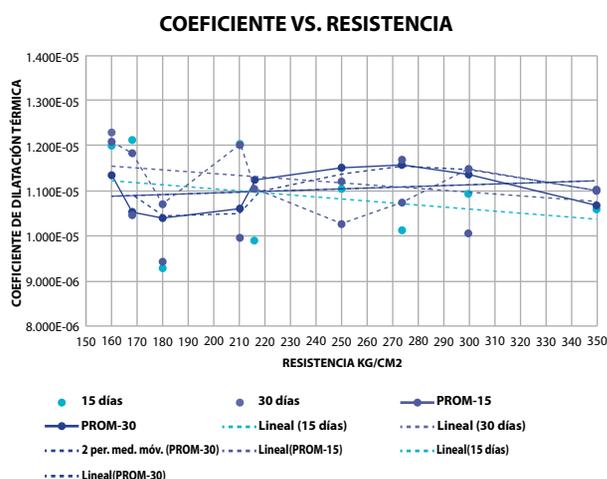


Gráfico 1. Coeficiente vs resistencia

En la siguiente gráfica se puede verificar un pequeño descenso, inversamente proporcional a su resistencia.

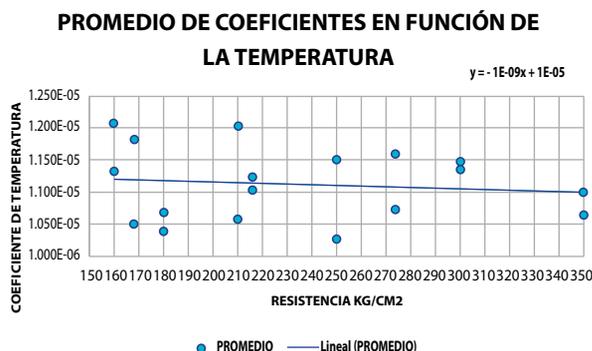


Gráfico 2. Promedio de coeficientes vs. Resistencia

En un análisis de la desviación estándar de los valores del gráfico 2, no pasa del 5%, donde casi todos los puntos están dentro del margen de error admisible.

Con el empleo de la Fórmula y en un promedio total se puede determinar el siguiente valor:

$$\alpha = \frac{L_{maxdial}}{(L_o * (T_f - T_o))} \quad ec. 1$$

$$\alpha = \frac{0.257}{300 * (99.2 - 21.6)}$$

$$\alpha = 11.040 * 10^{-6}$$

El valor determinado se puede emplear con una confiabilidad mayor al 95%, ya que la diferencia entre el valor del coeficiente del hormigón con una resistencia de 160 Kg/cm<sup>2</sup> al de 350 kg/cm<sup>2</sup>, no pasa del 2%, como se puede verificar mediante la determinación de la línea de tendencia:

$$y = -1^{-9} * X + 1^{-5} \quad ec. 2$$

ecuación de la línea de tendencia

X	Y
160	0.00000984
350	0.00000965

Diferencia de valores en porcentaje	1.931%
	1.969%

## CONCLUSIONES

Los cambios dimensionales del hormigón son importantes para la 'Serviciabilidad' de las estructuras de edificios de gran altura y también las losas de pavimento rígido.

Se logró determinar los coeficientes de dilatación para los diferentes especímenes realizados durante este ensayo, llegando a valores aceptables que se encuentran dentro del rango de lo que es el coeficiente de dilatación térmica del hormigón. Se realizó tanto el método analítico como gráfico, obteniendo resultados similares y concordantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- López, L., Oblitas, R., Ramírez, M., (2022). Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión de hormigones elaborados con tres marcas de cemento tipo IP disponibles en la ciudad de La Paz. Proyecto de Grado.
- Pacelli de Andrade, W., França Fontoura, J.T., Machado Bittencourt, R., Guerra, E.A., "Thermal properties of concrete for some Brazilian dams", 14th Congress of Large Dams, Rio de Janeiro, Brazil, 1982, paper C3, 1111-1138
- Torrent, R.J. and Fucaraccio, J., "Appropriate experimental techniques for the control of thermal cracking in large concrete masses", Intern. onvention on Temperature Effects on Concr. and Asphalt Concr., Baghdad, Irak, June 1982.

# INGENIUM



# Implementación de Hormigón Permeable Sobre Cunetas para la Gestión Ecológica del Agua en Sucre

Ventura, H.a, Rodríguez, A.b

(a) Estudiante de pregrado de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: [hyandirahelen123@gmail.com](mailto:hyandirahelen123@gmail.com)

(b) Docente de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: [rodriguez.abel@gmail.com](mailto:rodriguez.abel@gmail.com)

Recibido: 03/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Publicado: 10/11/2024

## RESUMEN

Este estudio se enfoca en el diseño de una plataforma de hormigón permeable que se colocará sobre las cunetas en la ciudad de Sucre, Bolivia, con el objetivo de mejorar la gestión de aguas pluviales, evitar obstrucciones por residuos y reducir los malos olores. La plataforma está diseñada para ajustarse a la estética colonial del centro histórico, ofreciendo una solución funcional y sostenible.

Se probaron cuatro diseños de hormigón permeable, variando la relación agua/cemento y el contenido de vacíos, y evaluando su resistencia a compresión y flexión. A partir de estos resultados, se determinó el caudal de infiltración para cada diseño, comparando su desempeño con diferentes pendientes de las calles de Sucre. Se realizaron pruebas con pendientes del 0% y 5% para medir la capacidad de infiltración del agua en cada caso.

Los resultados mostraron que el diseño con una relación agua/cemento de 0.33 y un contenido de vacíos del 15% es el más eficiente, especialmente en calles con pendientes moderadas. Este diseño logra un balance entre permeabilidad y capacidad estructural, lo que permite su implementación en calles de tránsito ligero en Sucre, donde el caudal de infiltración se ajusta a las necesidades del entorno urbano.

**Palabras clave:** hormigón, permeabilidad, sumideros, resistencia

## ABSTRACT

This study focuses on the design of a permeable concrete platform to be placed over drainage gutters in the city of Sucre, Bolivia, with the goal of improving stormwater management, preventing blockages caused by debris, and reducing unpleasant odors. The platform is designed to fit the colonial aesthetic of the historic center, offering a functional and sustainable solution.

Four designs of permeable concrete were tested, varying the water/cement ratio and void content, and their compressive and flexural strength were evaluated. Based on these results, the infiltration rate for each design was determined, comparing its performance with different street slopes in Sucre. Tests were conducted on slopes of 0% and 5% to measure water infiltration capacity in each case.

The results showed that the design with a water/cement ratio of 0.33 and a void content of 15% is the most efficient, especially on streets with moderate slopes. This design achieves a balance between permeability and structural capacity, making it suitable for implementation on light-traffic streets in Sucre, where the infiltration rate meets the needs of the urban environment.

**Keywords:** concrete, permeability, drains, strength

## INTRODUCCIÓN

El hormigón permeable ha surgido como una solución eficiente para la gestión de aguas pluviales en áreas urbanas, permitiendo la filtración del agua a través de sus poros y reduciendo la acumulación superficial. Aunque sus orígenes se remontan al siglo XIX, su uso se expandió en la década de 1970, principalmente en proyectos de control de erosión y drenaje urbano. Hoy en día, se utiliza en estacionamientos, aceras, plazas y áreas de tránsito ligero, y es valorado por su capacidad de mitigar inundaciones.

A pesar de sus ventajas, el hormigón permeable presenta una menor resistencia mecánica en comparación con el hormigón convencional, lo que limita su aplicación en áreas de tráfico pesado. Por esta razón, es fundamental investigar dosificaciones adecuadas que equilibren la permeabilidad con la capacidad de soportar cargas.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar una plataforma de hormigón permeable que se instalará sobre las cunetas en la ciudad de Sucre, Bolivia, con el fin de mejorar la gestión de aguas pluviales, evitar malos olores y la obstrucción por basura. Sucre, reconocida como Patrimonio Cultural de la Humanidad, enfrenta problemas con su sistema de drenaje, debido a su topografía accidentada, lo que provoca acumulación de residuos y olores desagradables. Además de ofrecer una solución práctica, este estudio busca armonizar la infraestructura moderna con la estética colonial de la ciudad. Se espera que los resultados no solo mejoren la gestión de las aguas pluviales, sino que también promuevan la preservación del patrimonio arquitectónico, al integrar un diseño funcional y sostenible.

**Figura 1:** Plataforma de Hormigón permeable



**Fuente:** Elaboración propia

## MATERIALES Y MÉTODOS

El hormigón permeable, también conocido como hormigón sin fino o porosidad mejorada, generalmente consta de cemento Portland normal, agregado grueso uniforme y agua.

### MATERIALES

#### a) Agregados

Las granulometrías de los agregados utilizados en el hormigón permeable por lo general son de un solo tamaño entre 3/4 y 3/8 pulgadas. Según (ACI 522R-10,2010) pueden ser redondeados o triturados.

#### b) Materiales Cementales

Se utiliza como aglutinante principal.

#### c) Agua

La calidad del agua para el hormigón permeable se rige por los mismos requisitos que para el hormigón convencional, deben dosificarse con una relación a/c relativamente baja (0.26-0.40).

La normativa ACI522R-10,2010 nos proporciona rangos típicos de proporciones del hormigón permeable, como se puede observar en la siguiente tabla 1.

**Tabla 1:** Rangos Típicos de proporciones de materiales en el hormigón permeable.

PROPORCIONES KG/M3	
Materiales cementosos	270 a 450
Agregado	1190 a 1480
Masa por W/cm	0.27 a 0.34
Agregado: Radio de cemento por masa	4 a 4,5:1
Fino: Radio de agregado grueso por masa	0 a 1:1

**Fuente:** Extraído de la normativa ACI522R-2010, pág.17.

### PROCESO EXPERIMENTAL

El método utilizado para esta presente investigación es el de volúmenes absolutos b/bo, independientemente de cómo se derive la mezcla de prueba, como se puede observar en la tabla 2, se tiene los parámetros de % finos y el tamaño del agregado.

**Tabla 2:** Valores b/bo efectivos

b/bo		
	ASTM C33/C33M	ASTM /C33M
Porcentaje de agregados finos	Tamaño N° 8	Tamaño N° 37
0	0,99	0,99
10	0,93	0,93
20	0,85	0,85

**Fuente:** ACI 522R-10 pág. 15, 2010

Donde:

- b/bo = Volumen de agregado grueso vaciado en seco en una unidad de volumen de hormigón.
- b= Sólido del agregado grueso en una unidad de volumen de hormigón.
- bo= Volumen de sólido de agregado grueso en una unidad de volumen de agregado grueso.

Los valores b/bo para los agregados de tamaño máximo nominal que se usan normalmente en el hormigón permeable es de 3/4 a 3/8.

Los especímenes se evaluaron mediante ensayos de resistencia a la compresión y flexión, aplicando diferentes % de vacíos y % de agregado fino.

**Diseño 1**

- Contenido de vacíos = 10%
- a/c = 0.27
- Agregado Fino = 10%

**Diseño 2**

- Contenido de vacíos = 10%
- a/c = 0.33
- Agregado Fino = 20%

**Diseño 3**

- Contenido de vacíos = 20%
- a/c = 0.33
- Agregado Fino = 3%

**Diseño 4**

- Contenido de vacíos = 15%
- a/c = 0.33
- Agregado Fino = 0%

En la siguiente tabla se muestran los parámetros de dosificación utilizados en el presente proyecto.

**Tabla 3:** Diseños de Dosificaciones

DISEÑO	A/C	B/BO	% VACÍOS	% FINO
Diseño 1	0,27	0,93	10	10
Diseño 2	0,33	0,86	10	20
Diseño 3	0,33	0,97	20	3
Diseño 4	0,33	0,99	15	0

**Fuente:** Elaboración propia

La normativa ACI 522-10, menciona una serie de pasos para su respectiva dosificación las cuales se muestran a continuación.

- Determinar el peso del agregado grueso
- Ajuste del Peso del agregado
- Determinar el volumen de la pasta
- Determinar el contenido de cemento
- Determinar el contenido de agua
- Determinar el contenido del sólido
- Verificar el contenido de vacíos
- Agrupamiento iterativo de pruebas.

**ENSAYOS DE LOS AGREGADOS**

Los ensayos que se realizaron al agregado grueso y fino se muestran a continuación.

- Contenido de Humedad
- Densidad, Peso específico y Absorción del agregado grueso
- Densidad, Peso específico y Absorción del agregado fino
- Peso unitario y porcentaje de vacíos del agregado.

**PLATAFORMA DE HORMIGÓN PERMEABLE**

Para la presente investigación se realizó un prototipo de dimensiones 25x60x10 cm.

Se calculó la permeabilidad para el diseño 3 y 4, tomando en cuenta la pendiente del 0% y del 5%.

## MÉTODO RACIONAL

Para el cálculo del caudal necesario que aporta a una calle utilizaremos la siguiente fórmula.

$$Q = 2.78 CR * I * A \quad (1)$$

C: Coeficiente de escorrentía (lps)

I: Intensidad (mm/h)

A: Área de la cuenca (ha)

Para la Intensidad se utiliza la siguiente fórmula, extraído de la NB688,2004. Específicamente para la ciudad de Sucre.

$$i = \frac{180,2457 x f^{0.33096}}{t^{0.70310}} \quad (2)$$

F: Frecuencia de lluvia (años)

T: Duración de la lluvia (min)

Para el cálculo del tiempo de entrada se utilizará la siguiente fórmula, extraído de la NB688,2004

$$Te = \frac{0.7007 x (1.1-c)L^{1/2}}{s^{1/3}} \quad (3)$$

C: Coeficiente de escurrimiento

L: Longitud máxima de flujo de escurrimiento superficial (m)

S: Pendientes promedio

Para el cálculo del tiempo de recorrido se utilizará

$$T_i = \frac{L}{v x 60} \quad (4)$$

L: Longitud de la alcantarilla

V: Velocidad media de flujo en mps

Tp: Tiempo de trayecto en minutos

El tiempo de concentración es:

$$T_c = t_e + t_t \quad (5)$$

## RESULTADOS

Se muestra a continuación los resultados de ensayos de laboratorio del agregado grueso y fino.

**Tabla 4:** Ensayos de Laboratorio del agregado

Agregado	PU Compactado (Kg/m <sup>3</sup> )	PU Suelo (Kg/m <sup>3</sup> )	% Absorción	Peso Específico (Kg/m <sup>3</sup> )
Grava	1578	1513	1.23	2.61
Arena	1757	1586	2.18	2.53

**Fuente:** Elaboración propia

Los parámetros utilizados para los 4 diseños se muestran a continuación.

**Tabla 5:** Especificaciones para la dosificación

Tamaño del agregado Grueso	Volumen total Cilindro	Volumen total Prisma	% Pasta	yw	Gec
3/8	0.0053	0.0113	0.32	1000	3.04
3/8	0.0053	0.0113	0.32	1000	3.04
3/8	0.0053	0.0113	0.22	1000	3.04
3/8	0.0053	0.0113	0.27	1000	3.04

**Fuente:** Elaboración propia

Las dimensiones utilizadas para los cilindros y prismas se muestran a continuación:

**Tabla 6:** Dimensiones del cilindro

Dimensiones		Vol. Cilindro (cm <sup>3</sup> )	Vol. Cilindro (m <sup>3</sup> )
Altura (cm)	30	5301.4376	0.0053
Diámetro (cm)	15		

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 7:** Dimensiones del prisma.

Dimensiones		Vol. Prisma (cm <sup>2</sup> )	Vol. Prisma (m <sup>2</sup> )
Altura (cm)	15	11250.0000	0.0113
Ancho	15		
Largo	50		

**Fuente:** Elaboración propia

Las propiedades del cemento y agua se pueden observar en la siguiente tabla:

**Tabla 8:** Propiedades del cemento y agua

	Cemento	Agua
P.E (Kg/m3)	3.04	1.00
Marca	Fancesa	
Tipo	IP-40	

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 2:** Vaciado del Hormigón permeable Diseño 1



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 3:** Vaciado del Hormigón permeable diseño 2



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4:** Vaciado de hormigón permeable Diseño 3 y Diseño 4.



**Fuente:** Elaboración propia

A continuación, se observan las propiedades mecánicas a la compresión y flexión del hormigón permeable.

**Tabla 9:** Resultados de la resistencia a compresión

Diseños	Resistencia a compresión del concreto	
	Día 7 Esfuerzo (Mpa)	Día 28 (Pry) Esfuerzo (Mpa)
Diseño 1	7.84	14,25
Diseño 2	38.5	70
Diseño 3	11.58	21.05
Diseño 4	22.66	41.2

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5:** Ensayo de Compresión



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 10:** Resultados de la resistencia a la flexión  
**Resistencia a Flexión del Concreto**

Diseños	Día 7	Día 28 (pry)
	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
Diseño 1	---	
Diseño 2	3.6	6.54
Diseño 3	2.1	3.82
Diseño 4	2.3	4.18

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 6:** Ensayo a Flexión



**Fuente:** Elaboración propia

Para el presente proyecto se realizaron moldes de madera con las dimensiones 25x60x10 cm, con los cuales se realizará los ensayos de infiltración considerando la variación del % pendientes.

**Figura 7:** Vaciado del hormigón permeable en los moldes de dimensiones 25x60x10cm



**Fuente:** Elaboración propia

A continuación, se observan las propiedades hidráulicas capacidad de filtración, del concreto permeable para los diseños 3 y 4.

**Tabla 11:** Pendiente 0%

Diseños	Tiempo (s)	Q(L/s)
Diseño 3	5	0.7
Diseño 4	5.5	1

**Fuente:** Elaboración Propia

**Tabla 12:** Pendiente del 5%

Diseños	Tiempo (s)	Q(L/s)
Diseño 3	5	0.58
Diseño 4	5.5	0.6

**Fuente:** Elaboración propia

### CONCLUSIONES

Se puede notar que específicamente la dosificación del diseño 1 donde la relación agua cemento, es de 0.27 es insuficiente, como se puede observar en la siguiente imagen, la pasta parece apagada y muy poca de esta queda adherida a los guantes, la esfera se desmorona rápidamente.

**Figura 8:** Agua insuficiente



**Fuente:** Elaboración propia

La resistencia de compresión y flexión no fueron suficientes debido al mezclado y a la insuficiencia del agua.

Por ese motivo para las siguientes dosificaciones se aumentó la relación agua cemento a 0.33.

Cabe recalcar que la normativa ACI nos indica un parámetro de relación agua cemento, de 0.27 a 0.34.

Para esta presente investigación se tomaron los parámetros de inicio y fin, pero para siguientes investigaciones se recomienda optar por diferentes datos de relaciones de agua cemento, un valor intermedio para comprobar sus propiedades mecánicas e hidráulicas.

Para obtener una buena mezcla, se debe tener cuidado del % de agua para cada dosificación, teniendo los siguientes casos:

1. Para una correcta dosificación se forma una esfera con las manos y esta debe permanecer unida a la pasta de cemento que debe ser brillante. (Metodología de comprobación empírica)

**Figura 9:** Correcta cantidad de agua



**Fuente:** Elaboración propia

2. Se puede observar si se aumenta el % de agua la pasta parece plástica y los aguantos quedan cubiertos casi totalmente de pasta, mucha agua adelgaza la pasta y el concreto se siente suelto y viscoso. (Metodología de comprobación empírica)

**Figura 10:** Mucha agua



**Fuente:** Elaboración propia

La plataforma de hormigón permeable, con dimensiones de 25x60x10 cm, se puede notar que el diseño 4 es el más eficiente teniendo una mejor resistencia tanto a flexión como a compresión, con un caudal de 1 litro/seg, para una pendiente del 0%, y un caudal de infiltración de 0.7 Litros/seg para una pendiente del 5 %.

**Figura 11:** Plataforma de Hormigón permeable

Diseño 4



**Fuente:** Elaboración propia

Para una calle con una pendiente del 5% y un bombeo del 2%, y un ancho de 5 metros, se tomaron los siguientes valores:

- El tiempo de entrada ( $t_e$ ) calculado es de 1.9 minutos. Sin embargo, de acuerdo a la norma NB688, el tiempo mínimo de entrada debe ser de 5 minutos.
- El tiempo de transporte ( $T_t$ ) es de 2 minutos, lo que resulta en un tiempo total de concentración ( $t_c$ ) de 7 minutos. La norma NB688 establece que el tiempo de concentración mínimo debe ser de 10 minutos.
- La intensidad de lluvia es de 18.58 mm/h y el coeficiente de escorrentía ( $C$ ) es 0.95, lo que genera un caudal de entrada de 8 l/s.

Este caudal indica que serían necesarias 4 plataformas de hormigón permeable a cada lado de la calle para gestionar adecuadamente el flujo de agua pluvial.

## BIBLIOGRAFÍA

- American Concrete Institute. (2010). *Report on pervious concrete (ACI 522R-10)*. American Concrete Institute.
- Samohod Romero, A. (2018). *Diseño de pavimento rígido permeable para la evaluación de aguas pluviales según la norma ACI 522R-10*. Universidad San Martín de Porres.
- Servicio Nacional de Normalización, Metrología y Calidad (IBNORCA). (2004). *NB 688: Drenaje pluvial urbano - criterios de diseño*. Instituto Boliviano de Normalización y Calidad.

# INGENIUM



# Comportamiento del Módulo Resiliente en Suelos Tipo A - 2 - 4 y A - 2 - 6 Considerando el Efecto del Contenido de Humedad - con Aplicación al Diseño

Arcos Casillas Jaqueline

(a) Peres Núñez Washington, washington.nunez@ufrgs.br

Recibido: 03/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Publicado: 10/11/2024

## RESUMEN

El presente documento presenta el análisis de dos tipos de suelos de subrasante A - 2 - 4 y A - 2 - 6, los cuales según su caracterización presenta comportamientos diferentes por la composición estructural perteneciente a las partículas internas del propio suelo. Este comportamiento de igual manera es afectado por el porcentaje de humedad introducido en el estudio del suelo. Se determinó el módulo resiliente por el método empírico y método experimental, el método empírico consiste en el uso de ecuaciones empíricas que están en función de la capacidad de soporte CBR, por otro lado el método experimental consiste en determinar el módulo resiliente en siete muestras para cada tipo de suelo realizado en el equipo triaxial cíclico Servo - Pneumatic Universal Testing Machine CRT-UTM-UN de la línea COOPER TECHNOLOGY que tiene incorporada en su funcionamiento los parámetros de la normativa AASHTO T307-99, las muestras para el estudio tienen porcentajes de variación de contenido de humedad, en el caso del suelo tipo A-2-4 se consideró los siguientes porcentajes de humedad:  $w_{opt}+2$ ,  $w_{opt}+1$ ,  $w_{opt}$ ,  $w_{opt}-1$ , en el caso del suelo tipo A-2-6 se consideró los porcentajes de humedad:  $w_{opt}+2$ ,  $w_{opt}+1$ ,  $w_{opt}$ ,  $w_{opt}-1$ ,  $w_{opt}-2$ , observando el comportamiento de módulo resiliente al esfuerzo axial aplicado dentro de una presión de confinamiento, se verificó la deformación acumulada durante el ensayo como también la variación de módulo resiliente respecto al esfuerzo desviador. Se realizó el diseño de un pavimento flexible siguiendo el método de diseño mecánico empírico sudafricano (SAMDM), la aplicación al diseño se realizó mediante el uso de análisis de pavimento por el software EVERSTRESS 5.0 con el cual se realizó el análisis elástico en capas, determinando tensiones, deformaciones y deflexiones, introduciendo de manera adecuada los resultados de módulo resiliente a un análisis estructural de pavimentos.

**Palabras clave:** Módulo Resiliente, Método Empírico, Método Experimental, Análisis Elástico.

## ABSTRACT

This document presents the analysis of two types of subgrade soils, A-2-4 and A-2-6, which, according to their characterization, exhibit different behaviors due to the structural composition of the internal particles of the soil itself. This behavior is also affected by the moisture content introduced in the soil study. The resilient modulus was determined using both the empirical and experimental methods. The empirical method consists of using empirical equations based on the California Bearing Ratio (CBR), while the experimental method involves determining the resilient modulus in seven samples for each type of soil using the Servo-Pneumatic Universal Testing Machine CRT-UTM-UN from COOPER TECHNOLOGY, which incorporates the parameters of the AASHTO T307-99 standard. The samples for the study have varying moisture content percentages. For A-2-4 soil, the following moisture percentages were considered:  $w_{opt}+2$ ,  $w_{opt}+1$ ,  $w_{opt}$ ,  $w_{opt}-1$ . For A-2-6 soil, the moisture percentages considered were:  $w_{opt}+2$ ,  $w_{opt}+1$ ,  $w_{opt}$ ,  $w_{opt}-1$ ,  $w_{opt}-2$ . The behavior of the resilient modulus under axial stress applied within a confining pressure was observed, and the accumulated deformation during the test, as well as the variation of the resilient modulus with respect to the deviatoric stress, were verified. A flexible pavement design was carried out following the South African mechanistic-empirical design method (SAMDM). The application of the design was done using pavement analysis software EVERSTRESS 5.0, which performed the elastic layer analysis, determining stresses, deformations and deflections, and appropriately incorporating the resilient modulus results into a structural pavement analysis."

**Key words:** Resilient Modulus, Empirical Method, Experimental Method, Elastic Analysis.

## INTRODUCCIÓN

Estructuras viales como ser: terraplenes, pavimentos y ferrovías, se hallan conformadas por diferentes capas, las cuales están dispuestas según sus características y propiedades físicas geo mecánicas para poder afrontar las exigencias de diseño. Por consecuente la subrasante según el sitio de emplazamiento de diseño va a dar lugar a diferentes tipos de materiales y características mecánicas infinitas.

La cualidad de una estructura vial es la de resistir cargas transitorias, debiendo estar en condiciones de soportar cargas de tipo dinámico cíclico y no estáticas. Sometiendo a la estructura vial a estados de esfuerzo en cada ciclo de aplicación de carga y descarga, provocando la reacción del suelo manifestado en deformaciones y desplazamientos.

Por otro lado los cambios climáticos, efecto ambiental y eventos catastróficos, influyen y afectan en consideración a las capas de la estructura vial, por lo tanto la influencia del contenido de humedad el efecto succión y la presión de poro de agua que se genera bajo cargas dinámicas, son condicionantes que pueden alterar el comportamiento de la estructura vial.

La implementación de la nueva guía mecánico - empírico para el diseño de pavimentos (MEPDG) de AASHTO en 2011, ha demostrado el rol fundamental que tienen los factores climáticos en el desempeño del pavimento, en particular los efectos de contenido de humedad.

El diseño de la estructura de pavimento fue casi exclusivamente empírico basado en la experiencia hasta aproximadamente el final de la segunda guerra mundial en 1945. La primera conferencia internacional sobre la estructura de diseño de pavimentos asfálticos fue dada por Ann Arber, en Michigan 1962, considerado el inicio de aplicación al diseño de pavimentos.

En el transcurso del tiempo se tuvieron avances de métodos de diseño las cuales conocemos ahora como mecánico – empírico (M-E).

Mecánico en atribución a la mecánica de los sólidos, que estudia los cuerpos formados por partículas que imponen restricciones de movimiento unas a otras.

Empírico debido a la asunción de parámetros de diseño basados en la experiencia.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento del módulo resiliente en suelos tipo A – 2 – 4 y A – 2 – 6, considerando efectos de humedad, con aplicabilidad al diseño de pavimentos.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar las metodologías empírica y experimental para obtención del módulo resiliente.
- Realizar la evaluación del módulo resiliente por el método experimental considerando el esfuerzo de confinamiento, esfuerzo axial, esfuerzo desviador y deformaciones según los porcentajes de humedad establecidos en cada prueba.
- Calcular tensiones, deformaciones y deflexiones con ayuda del programa Everstress 5.0.
- Seleccionar los posibles modelos de estructura de pavimento, considerando el análisis en porcentaje de humedad bajo, medio y alto.
- Identificar la mejor opción para la estructura de pavimento, examinando la mejor condición de contenido de humedad.

## MÓDULO RESILIENTE – MÉTODO EMPÍRICO

En nuestro medio existe bibliografía enfocada al diseño y construcción de estructuras viales, estos recomiendan modelos de correlación entre el Módulo resiliente – CBR.

Los modelos presentados a continuación  $M_r = f(\text{CBR})$ , son utilizados por simple estadística. No existe ninguna relación física entre el CBR y  $M_r$ , debido a que el CBR representa el índice de resistencia de los suelos y  $M_r$  representa la medida de deformación en pavimentos.

- La primera relación obtenida entre  $M_r$  – CBR fue desarrollado por Heukelom y Foster (1960). Pruebas dinámicas realizadas sobre diversos tipos de suelo. Los resultados condujeron a la siguiente relación:

$$M_r (\text{psi}) = 1565 * \text{CBR} \quad \text{Ec.A.}$$

Esta relación puede expresarse en MPa:

$$M_r (\text{MPa}) = 10.79 * \text{CBR} \quad \text{Ec.1.}$$

- En 1962, Heukelom colaboró con Klomp. Los resultados condujeron a la siguiente relación:

$$M_r (\text{psi}) = 1500 * \text{CBR} \quad \text{Ec.B.}$$

Esta relación puede expresarse en MPa:

$$M_r (\text{MPa}) = 10.34 * \text{CBR} \quad \text{Ec.2.}$$

- Concilio Sur Africano de Investigaciones Científicas e Industriales (CSRI), adoptó ecuaciones de  $M_r = K * \text{CBR}$ , modificando el factor k que depende de la prueba en campo y de laboratorio.

$$M_r (\text{psi}) = 3000 * \text{CBR}^{0.65} \quad \text{Ec.C.}$$

Esta relación puede expresarse en MPa:

$$M_r (\text{MPa}) = 20.68 * \text{CBR}^{0.65} \quad \text{Ec.3.}$$

- Green y Hall U.S (1975). Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), presenta la siguiente correlación, comparando la medida de onda de vibración medida de propagación in situ CBR.

$$Mr (psi)=5409*CBR^{0.71} \quad Ec.D.$$

Esta relación puede expresarse en MPa:

$$Mr (MPa)=37.29*CBR^{0.71} \quad Ec.4.$$

- Powell et al (1984), Programa Nacional de Investigación de Carreteras Cooperativas (NCHRP) (2004) y Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL).

$$Mr (psi)=2555*CBR^{0.64} \quad Ec.E.$$

Esta relación puede expresarse en MPa:

$$Mr (MPa)=17.61*CBR^{0.64} \quad Ec.5.$$

### MÓDULO RESILIENTE – MÉTODO EXPERIMENTAL

El método experimental hace referencia a un ensayo de laboratorio específico que determina el módulo resiliente. En este caso el ensayo de módulo resiliente o también llamado ensayo triaxial cíclico, dinámico o de carga repetida.

La obtención de módulo resiliente a partir del ensayo triaxial dinámico de carga repetida, se encuentra bajo la norma AASHTO T 307 – 99 “Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials”.

El ensayo triaxial dinámico es el estudio de la resistencia y deformabilidad de los suelos, tiene como objeto fundamental del ensayo la obtención de módulo de resiliencia, simulando experimentalmente diferentes estados de esfuerzo variando la presión de confinamiento y esfuerzo desviador, lo que simula las cargas variantes que genera el paso de los vehículos, sobre una probeta cilíndrica.

El módulo resiliente ( $M_r$ ) matemáticamente se define como la relación entre el esfuerzo desviador o dinámico ( $\sigma_d$ ) y la deformación unitaria recuperada ( $\epsilon_r$ ) en una carga dinámica repetida.

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad Ec.6.$$

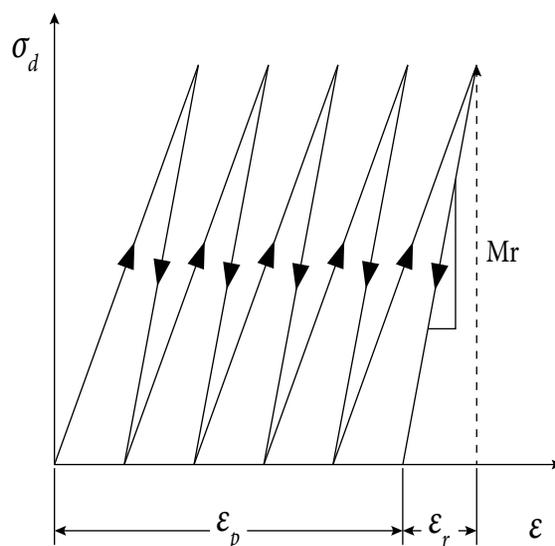
Donde:

Esfuerzo axial total (esfuerzo principal mayor).

$\sigma_3$ = Esfuerzo radial total, referido a la presión de confinamiento aplicada en la cámara triaxial (esfuerzo principal, intermedio y menor).

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = Esfuerzo desviador o dinámico, referido al esfuerzo axial repetido para este procedimiento.

$\epsilon$ = Deformación axial total debida a  $\sigma_d$  ;  $\epsilon_r$ = Deformación axial resiliente (recuperada).



$\epsilon$  = Deformación

$\epsilon_r$  = Deformación resiliente

$\sigma_d$  = Tensión desviadora  $\epsilon_p$  = T Deformación resiliente

**Figura 1.** Comportamiento elástico – plástico, varios ciclos de carga.

(Fuente: Minaya González S., Ordóñez Huamán A.)

En la figura 1 se aprecia el comportamiento del esfuerzo desviador respecto a la deformación, a cada carga inducida se genera una deformación permanente y resiliente.

### DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO TRIAXIAL CÍCLICO

En este caso se utilizó el equipo Servo – Pneumatic Universal Testing Machine CRT-UTM-NU, de la línea COOPER TECHNOLOGY. Equipo que se encuentra en la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra – Bolivia.

Este equipo es una evolución de la NAT (Nottingham Asphalt Tester), desarrollada por Keith Cooper y el profesor Steven Brown en la Universidad de Nottingham. Está compuesto por un sistema triaxial para la realización de los ensayos previstos por la norma AASHTO T307 en muestras de suelo de 200 mm de alto x 100 mm de diámetro.

El equipo triaxial está conformado por:

- Cámara de compresión triaxial
- Dispositivo de aplicación de carga
- Equipo de medida de la carga

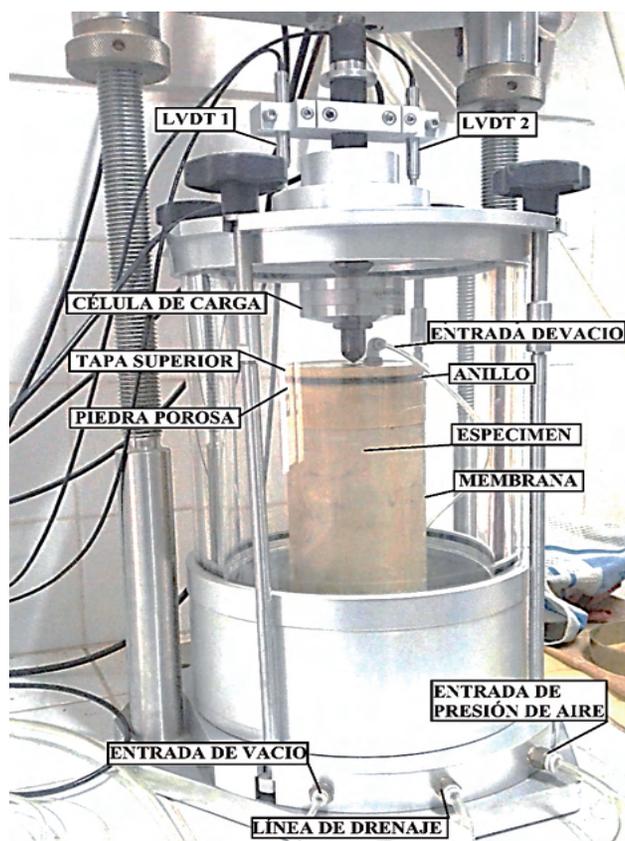


Figura 2. Montaje cámara triaxial

CRT-UTM-NU.

### MODELOS DE ECUACIONES PARA LA OBTENCIÓN DE MÓDULO RESILIENTE

El módulo resiliente se expresa en modelos matemáticos los cuales se utilizan para correlacionar diversos factores de esfuerzos y propiedades fundamentales del suelo, entre ellos están:

#### a) Modelo de esfuerzo Bulk

El modelo tiene como objetivo estimar el módulo resiliente de los suelos granulares, expresada en la siguiente ecuación:

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \quad \text{Ec.7.}$$

Donde:

$M_r$  = Módulo resiliente

$\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$  = Esfuerzo de Bulk

$k_1$  y  $k_2$  = Constantes

Este modelo no toma en cuenta la tensión/ deformación, debido a esa deficiencia Uzan (1985), demuestra que el modelo de esfuerzo Bulk no expresa suficientemente el comportamiento resiliente en suelos granulares.

May y Witzak (1981) modificaron el esfuerzo de Bulk agregando un nuevo factor:

$$M_r = K_1 k_1 \theta^{k_2} \quad \text{Ec.8.}$$

Donde:

$K_1$  = Está en función de la estructura de pavimento, carga de prueba y esfuerzos.

#### b) Modelo de esfuerzo desviador "semi-log"

El modelo de esfuerzo desviador fue recomendado por la norma AASHTO 1992, para estimar el módulo resiliente en suelos cohesivos, en consideración que el módulo resiliente es función del esfuerzo desviador en suelos cohesivos. El modelo de esfuerzo desviador presenta la siguiente ecuación:

$$M_r = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad \text{Ec.9.}$$

Donde:

$\sigma_d$  = Esfuerzo desviador

$k_1$  y  $k_2$  = Constantes

c) Modelos de módulo resiliente dependiente de la succión matricial.

Los modelos matemáticos de módulo resiliente para suelos no saturados, tienen como objetivo introducir los efectos de cambio de humedad y succión debido a la variación de cambios climáticos a la obtención de módulo resiliente.

Entre algunos modelos tenemos los siguientes:

- Witzac et al (2000). Propone el modelo que incorpora un factor ambiental que presenta los cambios de contenido de humedad sobre el módulo resiliente, evaluado en para condiciones particulares de esfuerzos externos aplicados. El modelo presenta la siguiente ecuación:

$$M_r = 10^a + \frac{b-a}{1 + \text{EXP}(\beta + K_s(S - S_{opt}))} * k_1 * P_a \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Ec.10.

Donde:

$S$  = Grado de saturación.

$S_{opt}$  = Grado de saturación bajo condiciones óptimas.

$\theta$  = Esfuerzo de Bulk.

$\tau_{oct}$  = Esfuerzo de corte octaédrico.

$P_a$  = Presión atmosférica

$k_1, k_2, k_3, a, b, k_s$  = Parámetros de regresión.

$$\beta = \ln(-b/a)$$

- Yang et al. (2005). Modelo se basa en la relación propuesta por Moosazadeh y Witzczak (1981), donde el parámetro de Bishop representa el contenido de humedad del suelo. Proponiendo incorporar al modelo de módulo resiliente el parámetro de succión matricial mediante el uso de la teoría de esfuerzos efectivos para suelos no saturados.

$$M_r = k_1 (\sigma_d + x_m \Psi_m)^{k_2} \quad \text{Ec.11.}$$

Donde:

$x_m$  = Parámetros de esfuerzos efectivos de Bishop.

$\Psi_m$  = Succión matricial.

$k_1$  y  $k_2$  = Parámetros de regresión.

- Liang et al. (2008). Propuso un modelo similar basado en la teoría de esfuerzos efectivos para suelos no saturados. Dicho modelo es una variación del modelo octaédrico. El modelo presenta la siguiente ecuación:

$$M_r = k_1 P_a \left[ \frac{(\Theta + x_m \Psi_m)}{P_a} \right]^{k_2} \left[ \frac{\tau_{oct}}{P_a} \right]^{k_3} \quad \text{Ec.12.}$$

Donde:

$x_m$  = Parámetros de esfuerzos efectivos.

$\Psi_m$  = Succión matricial.

### SOFTWARE EVERSTRESS 5.0

El software Everstress 5.0 es realmente imprescindible ya que se puede variar los espesores, números de cargas, coordenadas XY del punto de carga evaluado, presión de contacto de carga aplicada, radio del área cargada, puntos de evaluación XYZ respecto al punto de carga a evaluar.

Los resultados son los siguientes:

Sxx, Syy, Szz, Syz, Sxy, Sxz: Tensiones normales en las direcciones X-Y-Z.

Exx, Eyy, Ezz, Ux, Uy, Uz: Deformaciones normales en las direcciones X-Y-Z y deflexiones.

S1, S2, S3, E1, E2, E3: Tensiones principales y deformaciones principales.

Layered Elastic Analysis by Everstress 5.0

Layer	No of Loads: 2			No of X-Y Evaluation Points: 2		
	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli (1) (MPa)	Moduli (2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.30	5.000	3000.00			
2	.35	15.000	250.00	416.69	180.00	.600
3	.20	20.000	2000.00			
4	.45		180.00	114.71	65.00	-.400

Load N°	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

Normal Stresses

Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	451.91	521.06	-433.69	.00	6.61	.00
12.500	2	-72.99	-54.82	-283.37	.00	20.11	.00
40.010	4	-9.01	-6.70	-30.57	.00	4.09	.00

Normal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer	Exx (10-6)	Eyy (10-6)	Ezz (10-6)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.900	1	141.90	171.86	-241.86	1.645	.000	311.386
12.500	2	108.90	167.76	-572.69	-1.392	.000	258.252
40.010	4	67.63	96.86	-204.84	-11.201	.000	214.832

Principal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer	Exx (10-6)	Eyy (10-6)	Ezz (10-6)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	-433.74	451.96	521.06	-241.88	141.92	171.86
12.500	2	-285.28	-71.09	-54.82	-578.86	115.07	167.76
40.010	4	-31.32	-8.26	-6.70	-214.32	77.12	96.86

Normal Stresses

Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	-705.98	132.20	-179.13	.00	.00	.00
12.500	2	-124.42	-50.30	-202.68	.00	.00	.00
40.010	4	-9.12	-7.03	-33.08	.00	.00	.00

Normal Stresses

Z-Position (cm)	Layer	Exx (10-6)	Eyy (10-6)	Ezz (10-6)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	-230.63	132.58	-2.33	.000	.000	278.569
12.500	2	-86.10	154.04	-339.65	.000	.000	255.688
40.010	4	77.87	104.26	-225.04	.000	.000	222.236

Normal Stresses

Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10-6)	E2 (10-6)	E3 (10-6)
4.999	1	-705.98	-179.13	132.20	-230.63	-2.33	132.58
12.500	2	-202.68	-124.42	-50.30	-339.65	-86.10	154.04
40.010	4	-33.08	-9.12	-7.03	-225.04	77.87	104.26

Figura 3. Resultados.

Fuente: Programa Everstress 5.0

### MÉTODO DE DISEÑO MECÁNICO EMPÍRICO SUDAFRICANO (SAMDM)

SAMDM (South African Mechanistic-empirical Design Method). Este método analiza la estructura de un pavimento, considerando las respuestas estructurales que son tensiones de deformaciones y desplazamiento. Según los materiales que la constituyen a través de dos parámetros módulo de resiliencia, módulo de Young y coeficiente de Poisson's.

Las respuestas estructurales nos permiten obtener la evolución y acumulación del daño, atendiendo las exigencias de tránsito con valores de espesor admisibles.

Los modelos de daño se calibraron para cada uno de los principales grupos de materiales utilizados en la construcción de pavimentos.

Los modelos de daños actualmente previstos por la versión 1996 de SAMDM son:

### Fatiga asfáltica en mezcla caliente

- Fatiga de capas superficiales delgadas (<50 mm de grosor): de forma continua y sin graduación
- Fatiga de capas de base gruesas (> 75 mm de espesor)

### Base y sub base de capa granular

- Deformación permanente.

### Base y sub base cementadas

- Falla de aplastamiento.
- Fatiga efectiva
- Deformación permanente.

### Deformación permanente en la subrasante

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Resultados módulo resiliente – Método Empírico

Los resultados de módulo resiliente a partir de ecuaciones empíricas se muestran en la siguiente tabla 1 y 2 para la muestra A-2-4 y A-2-6.

**Tabla 1.** Resultado de módulo resiliente a partir de ecuaciones empíricas – Muestra A-2-4.

Nro	Autor	Ecuación	CBR%	MR (MPa)
1	Heukelom y Foster	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR$	11.19	120.74
2	Heukelom y Klomp	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR$	11.19	115.70
3	Consilio sur Africano (CSRI)	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR^{0.65}$	11.19	233.42
4	Green y Hall	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR^{0.71}$	11.19	417.39
5	Powell	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR^{0.64}$	11.19	196.94

**Tabla 2.** Resultado de módulo resiliente a partir de ecuaciones empíricas – Muestra A-2-6.

Nro	Autor	Ecuación	CBR%	MR (MPa)
1	Heukelom y Foster	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR$	14.23	153.54
2	Heukelom y Klomp	$Mr(MPa)=10.34 \cdot CBR$	14.23	147.14
3	Consilio sur Africano (CSRI)	$Mr(MPa)=20.68 \cdot CBR^{0.65}$	14.23	296.84
4	Green y Hall	$Mr(MPa)=37.29 \cdot CBR^{0.71}$	14.23	530.78
5	Powell	$Mr(MPa)=17.61 \cdot CBR^{0.64}$	14.23	250.45

Los valores de %CBR para ambos materiales son los correspondientes a 0.2" de penetración. Fall (1990), sugiere que la prueba de CBR es arbitraria y por lo tanto sus resultados son difíciles de vincular con el parámetro de rigidez del suelo. Angell (1988), señala que la relación de Heukelom y Klomp no es adecuada para estimar el módulo resiliente, indicando que "reduce" el modulo para un CBR menor del 5% y "mayora" el CBR mayor a 5%. Adama Dione et al. (2014), Admite que las correlaciones entre Mr – CBR deben ser usadas con cuidado por que tienden a "sobre dimensionar" y "bajo dimensionar" el módulo resiliente.

### Resultados módulo resiliente – Método Experimental

El ensayo cuenta con 2000 ciclos de carga y descarga, de los cuales 500 ciclos son de acondicionamiento usando ( $\sigma_3 = 41.4$  kPa -  $sd = 24.8$  kPa) ayudando a la muestra a acondicionarse recuperando su historia de esfuerzos y evitar el efecto tixotrópico. Los restantes 1500 ciclos con valores de ( $\sigma_3 = 41.4 ; 27.6 ; 13.8$  kPa -  $sd = 12.4 ; 24.8 ; 37.3 ; 49.7 ; 62.0$  kPa), contando con 100 ciclos para cada esfuerzo desviador y presión de confinamiento.

Se realizó ensayos en 7 probetas para la muestra A-2-4 y muestra A-2-6 respectivamente, con un total de 14 probetas ensayadas a diferentes porcentajes de humedad, como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Total de probetas ensayadas con su respectivo porcentaje de humedad.

Muestra 01 - tipo A-2-4				Muestra 02 - tipo A-2-6			
Nro	ID	W(%)	Densidad máxima seca (g/cm3)	Nro	ID	W(%)	Densidad máxima seca (gcm3)
1	w opt+2(1)	10.12	2.127	1	w opt+2(1)	10.53	2.072
2	w opt+1(1)	9.12	2.127	2	w opt+2(2)	10.53	2.072
3	w opt+1(2)	9.12	2.127	3	w opt+1(1)	9.53	2.072
4	w opt(1)	8.12	2.127	4	w opt(1)	8.53	2.072
5	w opt(2)	8.12	2.127	5	w opt-1(1)	7.53	2.072
6	w opt-1(1)	7.12	2.127	6	w opt-1(2)	7.53	2.072
7	w opt-1(2)	7.12	2.127	7	w opt-2(1)	6.53	2.072

El propósito de proyecto es cuantificar la variación de módulo resiliente producido al cambio de porcentaje de humedad. En las tablas 4 y 5 observamos el cambio de porcentaje de humedad producido antes y después del ensayo de módulo resiliente.

**Tabla 4.** Porcentaje de contenido de humedad antes y después del ensayo de Mr – muestra A-2-4.

ID	W(%)	Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	Antes del Ensayo		Después del Ensayo	
			W(%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	W(%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
w opt+2(1)	10.12	2.127	9.961	1.995	9.863	2.080
w opt+1(1)	9.12	2.127	9.806	2.097	9.578	2.163
w opt+1(2)	9.12	2.127	9.030	2.083	8.695	2.146
w opt(1)	8.12	2.127	8.849	2.161	8.462	2.206
w opt(2)	8.12	2.127	8.859	2.151	8.267	2.198
w opt-1(1)	7.12	2.127	7.518	1.900	7.545	1.960
w opt-1(2)	7.12	2.127	7.475	1.875	7.217	1.937

Los resultados de la tabla 4 obtenidos de la muestra A – 2 – 4, se aprecia el porcentaje de humedad óptimo +2 (wop +2), el cual no logro compilar al porcentaje de 10.12% de humedad, como también en las diferentes probetas podemos observar variaciones. Esto a causa del reposo de 24 hrs de homogenización de la muestra se pudo perder un porcentaje de humedad, como también en la extracción de muestra por el extractor Shelby el suelo llegó a sufrir un cambio en su estructura, por lo tanto, en su densidad. Por lo que podemos decir que el porcentaje de humedad al igual que la densidad son valores los cuales replicarlos es complicado.

**Tabla 5.** Porcentaje de contenido de humedad antes y después del ensayo de Mr – muestra A-2-6.

ID	W(%)	Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	Antes del Ensayo		Después del Ensayo	
			W(%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	W(%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
w opt+2(1)	10.53	2.072	10.880	2.073	10.376	2.093
w opt+2(2)	10.53	2.072	11.201	2.059	10.126	2.066
w opt+1(1)	9.53	2.072	9.823	1.990	9.292	2.099
w opt(1)	8.53	2.072	9.044	2.075	8.412	2.281
w opt-1(1)	7.53	2.072	7.933	2.109	7.260	2.118
w opt-1(2)	7.53	2.072	7.582	2.085	7.569	2.094
w opt-2(1)	6.53	2.072	6.965	2.044	6.213	2.043

En tabla 5. de la muestra A – 2 – 6, de igual forma se observa la variación de porcentaje de humedad y densidad antes y después del ensayo. Los resultados de módulo resiliente fueron obtenidos utilizando el modelo

de esfuerzo desviador “semi log” recomendado para determinar el comportamiento en suelos finos o fino granulares, por lo cual el módulo resiliente se muestra dependiente del cociente entre la tensión desviadora y la presión atmosférica. Aunque sean materiales del grupo A-2, los finos definen su comportamiento.

En las tablas 6 y 7. Se presenta los resultados de las constantes k1 y k2 de la ecuación de modelo de esfuerzo desviador “semi log”.

**Tabla 6.** Resultados de ecuación de módulo resiliente – muestra A-2-4.

Muestra 01 - TIPO A - 2 - 4					
W(%)	W(%)	K1	K2	r <sup>2</sup>	Rango de módulo correspondiente para $\sigma_d=12-62kPa$
		(MPa)			
w opt+2(1)	10.12	56.713	-0.203	0.4969	55-97
w opt+1(1)	9.12	74.573	-0.215	0.5697	73-125
w opt+1(2)	9.12	80.739	-0.183	0.4885	78-129
w opt(1)	8.12	119.63	-0.169	0.5965	119-187
w opt(2)	8.12	115.91	-0.123	0.2570	108-167
w opt-1(1)	7.12	76.728	-0.185	0.5482	74-127
w opt-1(2)	7.12	80.814	-0.188	0.5525	79-134

**Tabla 7.** Resultados de ecuación de módulo resiliente – muestra A-2-6.

Muestra 02 - TIPO A - 2 - 6					
ID	W(%)	K1	K2	r <sup>2</sup>	Rango de módulo correspondiente para $\sigma_d=12-62kPa$
		(MPa)			
w opt+2(1)	10.53	69.851	-0.227	0.5454	68 - 126
w opt+2(2)	10.53	68.989	-0.241	0.5418	67 - 127
w opt+1(1)	9.53	78.609	-0.195	0.4438	75 - 132
w opt(1)	8.53	102.34	-0.203	0.5529	100 - 184
w opt-1(1)	7.53	166.54	-0.12	0.4155	161 - 229
w opt-1(2)	7.53	148.12	-0.136	0.4701	142 - 206
w opt-2(1)	6.53	177.35	-0.068	0.2168	167 - 222

La constante k2 depende del estado de tensiones, valores elevados de k2 significa tensiones bajas y módulo bajo, por consiguiente, valores bajos de k2 significa tensiones altas módulo alto.

La constante k1 es el valor de módulo cuando. Los resultados de módulo resiliente en este caso se atribuyen a los resultados de k1. Se calculó el porcentaje

de variación de módulo en probetas ensayadas con el mismo porcentaje de humedad presentada en la tabla 8.

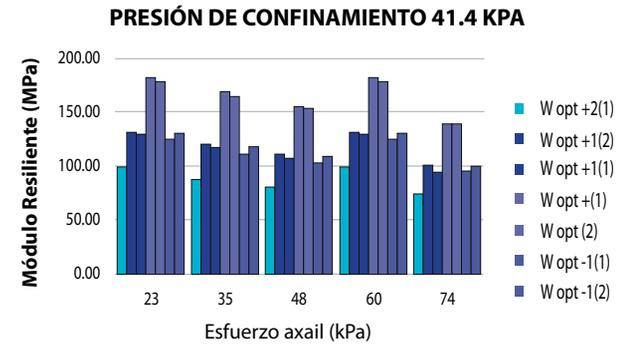
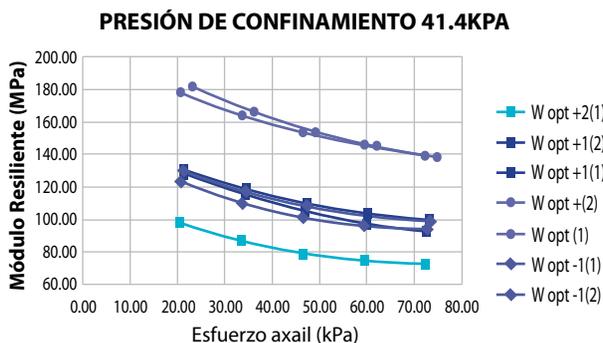
**Tabla 8.** Porcentaje de variación de módulo en probetas con el mismo porcentaje de humedad.

Muestra 01 - tipo A-2-4					Muestra 02 - tipo A-2-6				
Nro	ID	W(%)	KI	Variación de Mr	Nro	ID	W(%)	KI	Variación de Mr
1	w opt+2(1)	10.12	56.713	8%	1	w opt+2(1)	10.53	69.851	1%
2	w opt+1(1)	9.12	74.573		2	w opt+2(2)	10.53	68.989	
3	w opt+1(2)	9.12	80.739		3	w opt+1(1)	9.53	78.609	
4	w opt(1)	8.12	119.63	3%	4	w opt(1)	8.53	102.34	11%
5	w opt(2)	8.12	115.91		5	w opt-1(1)	7.53	166.54	
6	w opt-1(1)	7.12	76.728	5%	6	w opt-1(2)	7.53	148.12	11%
7	w opt-1(2)	7.12	80.814		7	w opt-2(1)	6.53	177.35	

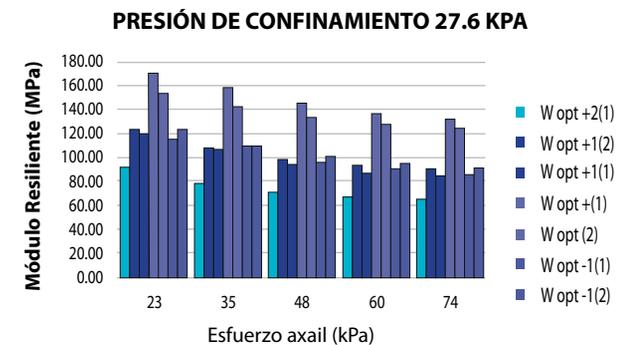
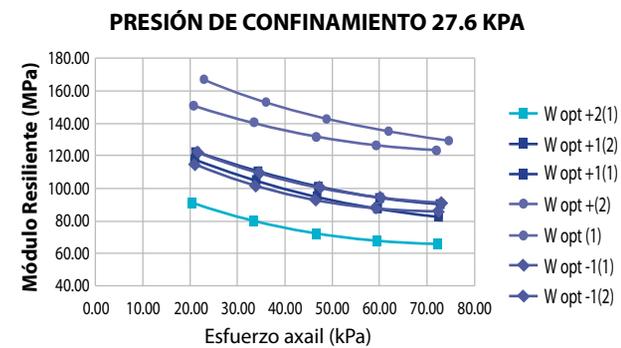
En resultados de la muestra A-2-4, apreciamos el mayor porcentaje de variación de 8 % en probetas con humedad óptima +1 (w opt + 1), concluyendo que a este porcentaje de variación debido al extractor de muestras Shelby, ya que al extraer la muestra de la probeta esta sufre un ligera presión ocasionando un empuje para que la muestra salga de la probeta y esto pudo provocar un leve cambio en la estructura de la muestra ensayada.

En resultados de la muestra A-2-6, apreciamos el mayor porcentaje de variación de 11 % en probetas con humedad óptima -1 (w opt -1), concluyendo que a este porcentaje de variación debido al extractor de muestras Shelby.

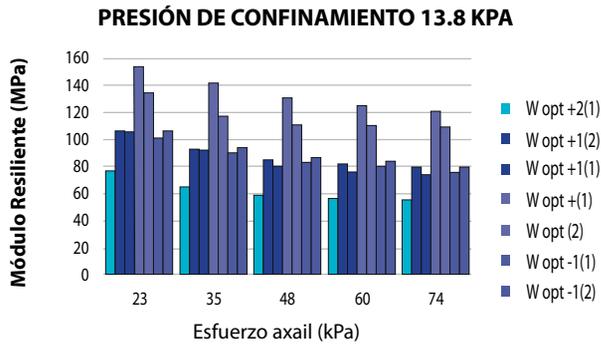
En las siguientes gráficas apreciaremos el comportamiento de la evolución de módulo resiliente con las diferentes presiones de confinamiento.



**Gráfica 1.** Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 41.4 kPa – Muestra A-2-4.



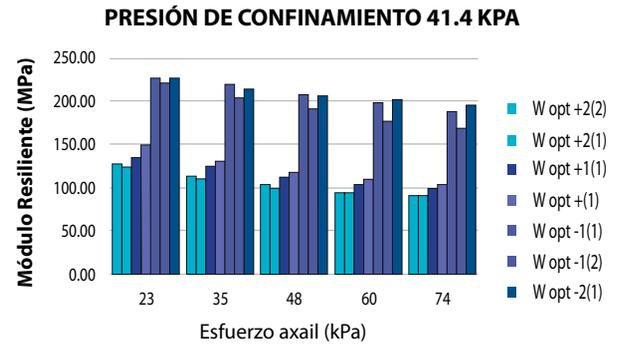
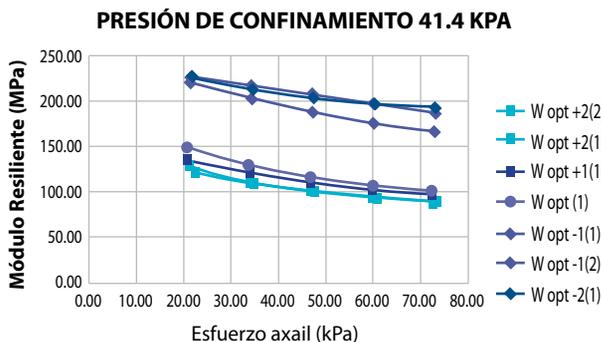
**Gráfica 2.** Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 27.6 kPa – Muestra A-2-4.



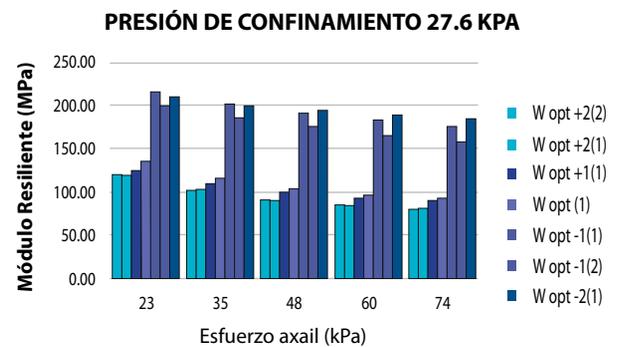
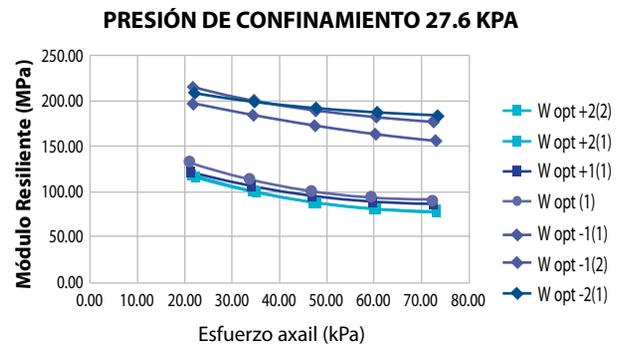
**Gráfica 3.** Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 13.8 kPa – Muestra A-2-4.

Las gráficas 1, 2 y 3 presentan los resultados de la muestra A-2-4. En la cual se observa un comportamiento de módulo resiliente respecto a la presión de confinamiento y esfuerzo axial, si bien el esfuerzo axial es menor al inicio del ensayo presenta mayor módulo resiliente, conforme se va incrementando gradualmente la carga se verifica que el módulo resiliente en esta muestra de suelo en una presión de confinamiento de 41.4MPa presenta una diferencia desde el inicio hasta el final del ensayo aproximadamente de 40MPa, conforme disminuimos la presión de confinamiento también se reduce la diferencia del módulo resiliente al inicio y final del ensayo pero sin mucha diferencia de respuesta de módulo resiliente, se atribuye este comportamiento a los espacios vacíos y contenido de humedad papel que juega la succión en los poros de contacto entre las partículas de suelo, haciendo que estos recuperen la deformación resiliente de una mejor manera, porque tienen ese espacio que permite su recuperación a una carga axial.

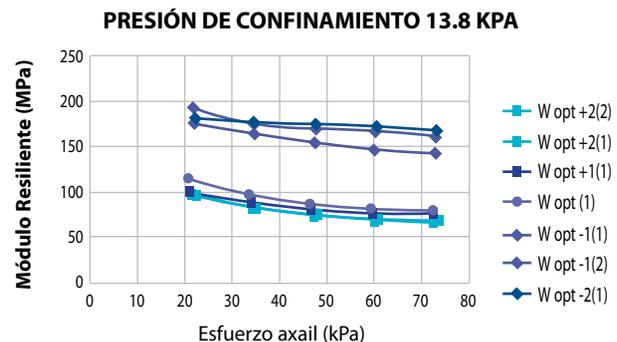
Los resultados del ensayo también indican que según la variación de contenido de humedad esta muestra tiene mejor respuesta con el contenido de humedad óptimo.

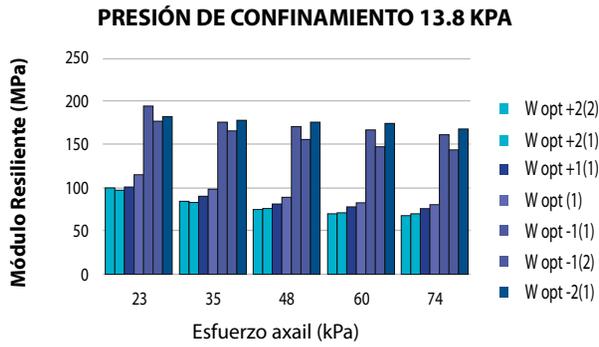


**Gráfica 4.** Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 41.4 kPa – Muestra A-2-6.



**Gráfica 5.** Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 27.6 ka – Muestra A-2-6.

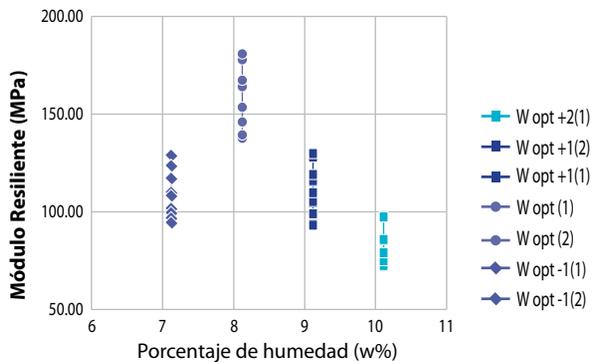




**Gráfica 6.** Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 13.8 kPa – Muestra A-2-6.

Las gráficas 4, 5 y 6. Presenta los resultados de la muestra A-2-6, el punto de vista del comportamiento de la muestra A-2-4 tiene semejanza al comportamiento de la muestra A-2-6 ya que se percibe a menor presión de confinamiento mejor capacidad de recuperación de deformación resiliente respecto a las cargas axiales inducidas. Sin embargo se percibe mayores valores de módulo resiliente respecto al porcentaje de humedad al lado seco porcentaje de humedad óptimo -1 y -2, no así con el porcentaje de humedad óptimo.

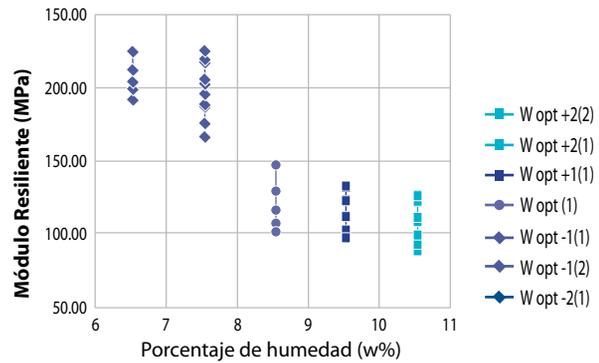
El comportamiento de módulo resiliente con respecto al contenido de humedad se refleja en las siguientes gráficas 7. y 8.



**Gráfica 7.** Comportamiento de Mr con respecto al contenido de humedad – Muestra A-2-4.

Se observa el comportamiento de la humedad óptima +1 (wop+1) que presenta la misma disposición de la humedad óptima -1 (w op - 1). Debido al comportamiento del suelo, como podemos observar en la curva de compactación el comportamiento es simétrico antes y después de la humedad óptima.

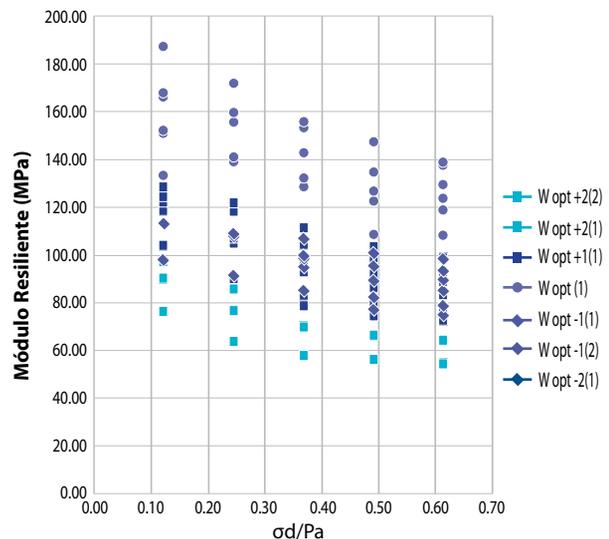
Se observa el valor máximo de módulo resiliente a la condición de humedad óptima (w op), por consiguiente al menor valor de módulo resiliente a la condición de mayor porcentaje de humedad +2 (w op + 2).



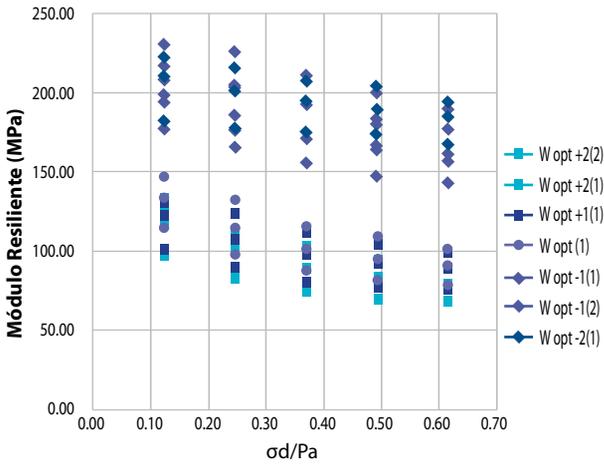
**Gráfica 8.** Comportamiento de Mr con respecto al contenido de humedad – Muestra A-2-6.

Se observa que los valores elevados de módulo resiliente se presentan por la humedad óptima -1 y -2 ( w op -1 y w op -2) que sería el lado seco, comportamiento debido a mayor concentración de arcillas en el material estudiado ya que presentan en el lado seco un mejor comportamiento que no altera su volumen teniendo más espacios vacíos en el que la succión realiza un buen desempeño, sin embargo el lado húmedo hace que las partículas de arcilla llenen los espacios vacíos generando poca capacidad de deformación resiliente que da lugar a menores valores de módulo resiliente, dados por la humedad óptima +1 y +2 ( w op +1 y wop+2).

En las gráficas 9 y 10 se presenta la incidencia de esfuerzo desviador al módulo resiliente.



**Gráfica 9.** Módulo resiliente vs. Esfuerzo desviador – Muestra A-2-4.



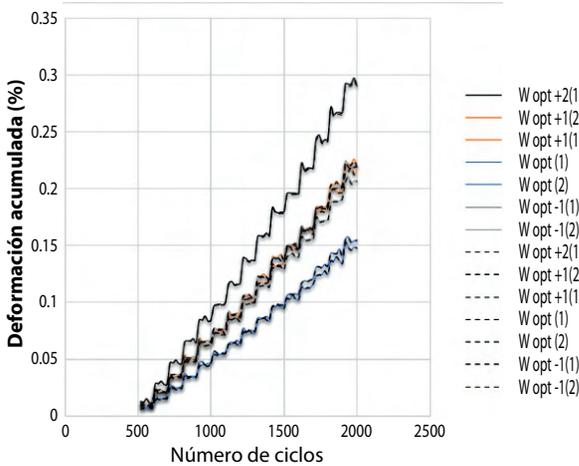
**Gráfica 10.** Módulo resiliente vs. Esfuerzo desviador – Muestra A-2-6.

Los dos tipos de suelos estudiados A – 2 – 4 y A – 2 – 6, presentan comportamiento de suelos fino granulares, como se observa en la gráfica 9 y 10 al aumento de esfuerzo desviador los valores de módulo resiliente decrecen. Argumento mencionado anteriormente por autores como Julián Vidal (2006), Rondó Quintana (2012).

En materiales grueso granulares el módulo resiliente aumenta conforme aumenta el esfuerzo desviador, Garnica Anguas (2002).

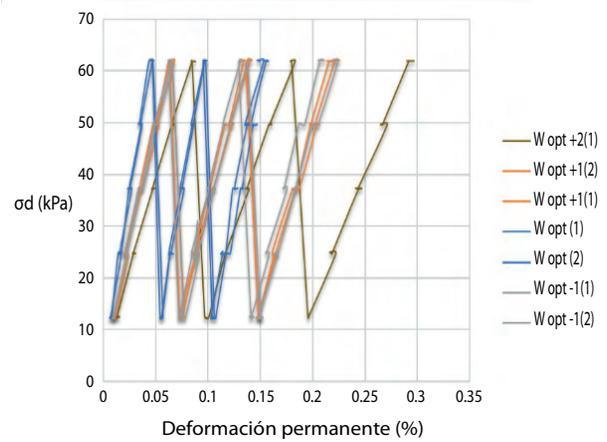
La deformación permanente presentada en los ensayos tuvo una evaluación hasta los 2000 ciclos de carga y descarga de los cuales 500 ciclos fueron de acondicionamiento.

En las gráficas 11, 12 y 13 presentan resultados respecto a la deformación permanente obtenidos en la muestra A – 2 – 4. Por otro lado las gráficas 14, 15 y 16 presentan resultados respecto a la deformación permanente obtenidos en la muestra A-2-6.



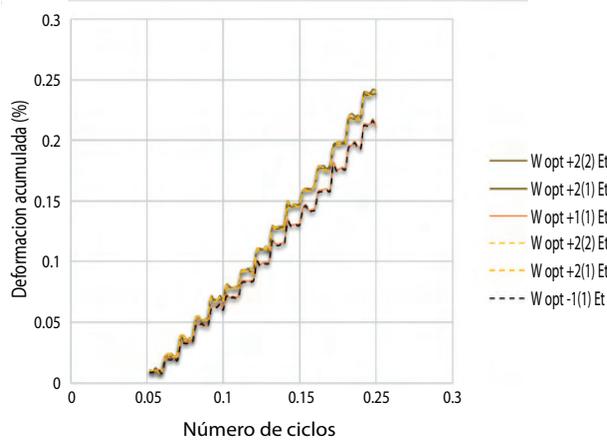
**Gráfica 11.** Evolución de la deformación acumulada en 2000 ciclos–Muestra A-2-4.

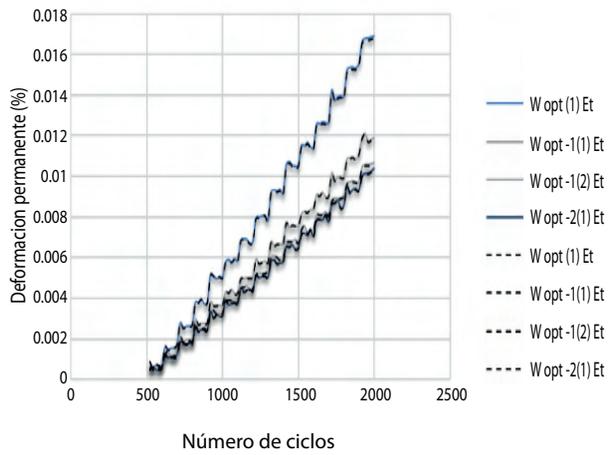
En los resultados de la muestra A – 2 – 4 de la gráfica 11, existe una diferencia mínima entre la deformación total (Et) y la deformación permanente (Ep) en todas las probetas ensayadas, esto debido a la cantidad de ciclos realizados. Las probetas con mayor porcentaje de deformación es la de humedad óptima +2 (w op + 2) con 0.28% de deformación, las probetas con humedad óptima +1 y -1 (w op +1 – w op -1) presentan deformaciones menores a la probeta con humedad óptima +2, presentando una deformación semejante aproximada de 0.2 %. En las 7 probetas estudiadas en la muestra A-2-4, se distingue el valor menor de deformación a las probetas ensayadas con humedad óptima (w op), con una deformación de 0.15%, la diferencia de deformación entre el valor mayor y menor de deformación es de 0.13%.



**Gráfica 12.** Evolución de la deformación total con respecto al esfuerzo desviador – Muestra A-2-4.

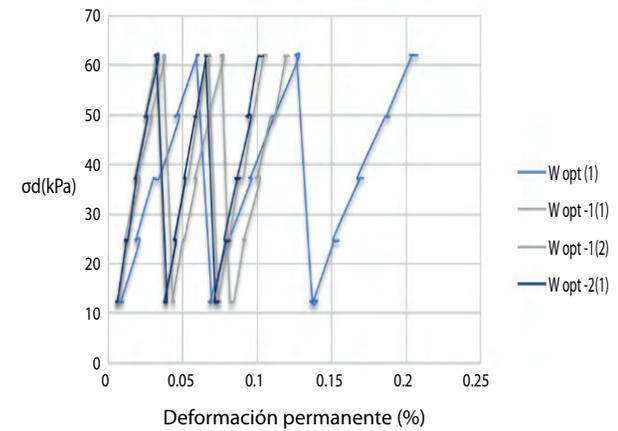
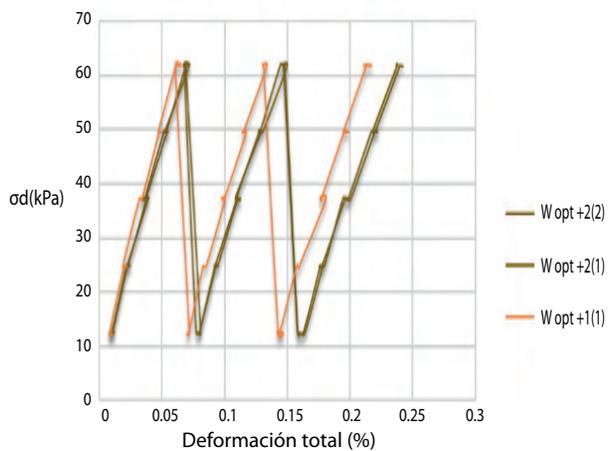
Se puede notar que la deformación en cada ciclo es acumulativo, según teorías esta acumulación va disminuyendo hasta que prácticamente desaparece llegando así a un estado de deformación recuperable, en ese momento se obtiene un comportamiento resiliente.





**Gráfica 13.** Evolución de la deformación acumulada en 2000 ciclos–Muestra A-2-6.

Los resultados de la muestra A-2-6 de la gráfica 13, al igual que la muestra A-2-4 existe una diferencia mínima entre la deformación total (Et) y la deformación permanente (Ep). El resultado de mayor deformación obtenida fue de las probetas con humedad óptima +2 (w op +2) con una deformación en 2000 ciclos de 0.24%, seguido de la probeta con humedad óptima +1 (w op +1) con 0.22% de deformación, grafica 13 (A). Por otro lado las probetas con humedad óptima (w op) obtuvieron una deformación de 0.02%, percibiendo la menor deformación las probetas con humedad óptima -2 (w op -2) con 0.01% de deformación, grafica 13 (B), la diferencia entre el valor de deformación mayor y menor es de 0.23%. Este comportamiento es atribuido gracias a la estructura del material fino granular, justificando que este tipo de suelo presenta mayor concentración de arcillas logrando más resistencia a una menor proporción de humedad.



**Gráfica 14.** Evolución de la deformación total con respecto al esfuerzo desviador – Muestra A-2-6.

En la gráfica 14 se aprecia la diferencia de deformación después de un ciclo en cada una de las probetas, con mayor humedad mayor deformación y a menor humedad menor deformación.

El módulo resiliente para propósito de diseño en los dos tipos de suelo A-2-4 (muestra 1) – A-2-6 (muestra 2), se calculó utilizando los porcentajes de humedad bajo, medio y alto en las dos muestras respectivas, por consiguiente estos porcentajes de humedad generaron valores de Mr menor, intermedio y mayor. Como se muestra en tabla 9.

**Tabla 9.** Valores de porcentaje de humedad y módulo resiliente, para el diseño de estructura de pavimento.

**Muestra 1: Arena mal graduada con arcilla SP SC**

ID	W(%)		Rango de módulo correspondiente para sd=12-62 kPa			
			k1 (MPa)	k2	r2	
w opt+2(1)	10.12	alto	70.366	0.1358	0.0819	55-97=Donde valor de Mr. menor
w opt-1(2)	7.12	bajo	98.873	0.099	0.0584	79-134=Donde valor de Mr. intermedio
w opt(1)	8.12	medio	143.87	0.0667	0.0346	119-187=Donde valor de Mr. mayor

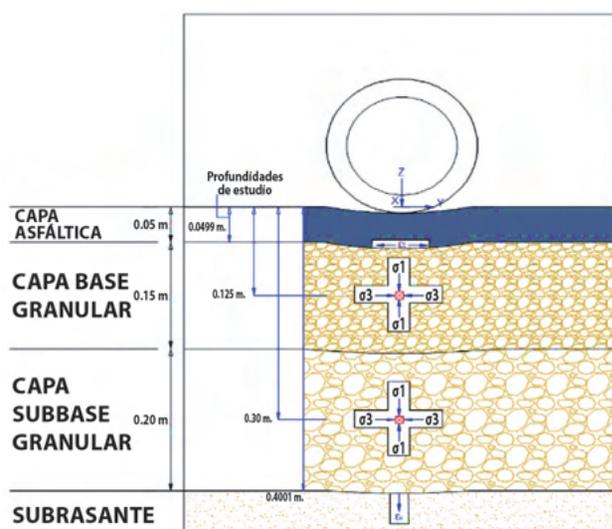
**Muestra 2: Arena arcillosa SC**

ID	W(%)		Rango de módulo correspondiente para sd=12-62 kPa			
			k1 (MPa)	k2	r2	
w opt+2(2)	10.53	alto	68.989	-0.241	0.5418	57-127=Donde valor de Mr. menor
w opt(1)	8.53	medio	102.34	-0.203	0.5529	100-184=Donde valor de Mr. intermedio
w opt-2(1)	6.53	bajo	177.35	-0.068	0.2168	167-222=Donde valor de Mr. mayor

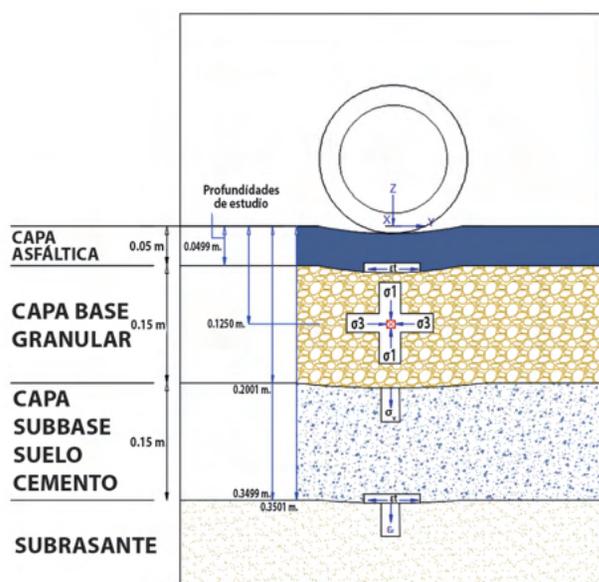
**Análisis para estructura de pavimento**

Para la implementación de módulo resiliente de la subrasante al diseño de una estructura de pavimento, se consideró dos opciones de diseño para ambos tipos de suelos A-2-4 y A-2-6.

1 er opción: Análisis de estructura de pavimento tradicional, con espesores normalmente utilizados.



2<sup>da</sup> opción: Análisis de estructura de pavimento con subbase de suelo cemento.



- Se consideró el análisis de fatiga en capas de revestimiento. Asumiendo que las grietas comienzan en la fibra inferior de la capa y se propaga hasta la superficie.
- Se asume que las capas granulares acumulan deformación permanente a partir del corte. Las capas granulares se analizan determinando el estado de esfuerzo cortante en el centro de la capa.
- Las capas estabilizadas se analizan como capas rígidas, por lo tanto se evalúa la fatiga efectiva en la parte inferior de la capa considerando la deformación de tracción horizontal. Las grietas se propagan a la parte superior donde tiene incidencia de aplastamiento empleando la tensión de compresión vertical.

- En la subrasante se analizó la deformación permanente respecto a la deformación de compresión vertical en la fibra inferior de la capa.

### Resultados de diseño estructural de pavimento

Resultados de diseño muestra A – 2 – 4 a diferentes porcentajes de humedad.

Estructura de pavimento tradicional con valor menor de Mr (wop+2(1)) - muestra 01		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
Fatiga en capa asfáltica	Nf= 78925.93(ESALs)	650049,99(ESALs)	12%
Ruptura por corte en capa base	Nf= 99676.40(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
Ruptura por corte en capa subbase	Nf= 567118.04(ESALs)	650049,99(ESALs)	87%
Deformación permanente en la subrasante	Nf= 42589.26(ESALs)	650049,99(ESALs)	7%

Estructura de pavimento con subsuelo con valor menor de Mr (wop+2(1)) - muestra 01		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
Fatiga en capa asfáltica	Nf= 2834877.01(ESALs)	650049,99(ESALs)	436%
Ruptura por corte en capa base	Nf= 47120527.11(ESALs)	650049,99(ESALs)	7249%
Aplastamiento en el tope de la capa subbase	Nf= 9967687.18(ESALs)	650049,99(ESALs)	1533%
Fatiga efectiva en la fibra inferior de la capa subbase	Nf= 799265.06(ESALs)	650049,99(ESALs)	123%
Deformación permanente en la subrasante	Nf= 48568973.10(ESALs)	650049,99(ESALs)	7472%

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor menor de Mr (wop+2(1)) - muestra 01	Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica Nf= 10790.44(ESALs)	650049,99(ESALs)	2%
2	Ruptura por corte en capa base Nf= 99491.32(ESALs)	650049,99(ESALs)	5%
3	Ruptura por corte en capa subbase Nf= 518913.31(ESALs)	650049,99(ESALs)	80%
4	Deformación permanente en la subrasante Nf= 453686.07(ESALs)	650049,99(ESALs)	70%

Nº	Estructura de pavimento con subbase suelo cemento con valor intermedio de Mr (wop-1(2)) - muestra 01	Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica Nf= 2460384.17(ESALs)	650049,99(ESALs)	378%
2	Ruptura por corte en capa base Nf= 38310717.23(ESALs)	650049,99(ESALs)	5894%
3	Aplastamiento en el tope de la capa subbase Nf= 9728379.61(ESALs)	650049,99(ESALs)	1497%
	Fatiga efectiva en la fibra inferior de la capa subbase Nf= 991965.44(ESALs)	650049,99(ESALs)	153%
4	Deformación permanente en la subrasante Nf= 150663186.33(ESALs)	650049,99(ESALs)	23177%

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor mayor de Mr (wop(1)) - muestra 01	Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica Nf= 142511.37(ESALs)	650049,99(ESALs)	22%
2	Ruptura por corte en capa base Nf= 98927.30(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
3	Ruptura por corte en capa subbase Nf= 469959.20(ESALs)	650049,99(ESALs)	72%
4	Deformación permanente en la subrasante Nf= 6849034.36(ESALs)	650049,99(ESALs)	1054%

Nº	Estructura de pavimento con subbase suelo cemento con valor intermedio de Mr (wop-1(2)) - muestra 01		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 2137238(ESALs)	650049,99(ESALs)	329%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 30646545.62(ESALs)	650049,99(ESALs)	4714%
3	Aplastamiento en el tope de la capa subbase	Nf= 9437308.36(ESALs)	650049,99(ESALs)	1452%
	Fatiga efectiva en la fibra inferior de la capa subbase	Nf= 1276041(ESALs)	650049,99(ESALs)	196%
4	Deformación permanente en la subrasante	Nf= 617539589.32(ESALs)	650049,99(ESALs)	94999%

Se considera la mejor opción de diseño de estructura de pavimento, considerando la humedad óptima de diseño (wop).

Resultados de diseño muestra A – 2 – 6 a diferentes porcentajes de humedad.

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor menor de Mr (wop+2(2)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 97001(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 99589.96(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
3	Ruptura por corte en capa subbase	Nf= 536312.41(ESALs)	650049,99(ESALs)	83%
4	Deformación permanente en la subrasante	Nf= 191892.25(ESALs)	650049,99(ESALs)	30%

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor menor de Mr (wop+2(2)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 2559224.08(ESALs)	650049,99(ESALs)	394%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 4065365.00(ESALs)	650049,99(ESALs)	5254%
3	Aplastamiento en el tope de la capa subbase	Nf= 97999.72(ESALs)	650049,99(ESALs)	1508%
	Fatiga afectiva en la fibra inferior de la capa subbase	Nf= 931016.22(ESALs)	650049,99(ESALs)	143%
4	Deformación permanente en la subrasante	107320996.50(ESALs)	650049,99(ESALs)	16510%

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor intermedio de Mr (wop(1)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 129599.73(ESALs)	650049,99(ESALs)	20%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 99196.38(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
3	Ruptura por corte en capa subbase	Nf= 487655.65(ESALs)	650049,99(ESALs)	75%
4	Deformación permanente en la subrasante	Nf= 2545713.42(ESALs)	650049,99(ESALs)	392%

Nº	Estructura de pavimento con subbase suelo cemento con valor intermedio de Mr (wop(1)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 2234561.00(ESALs)	650049,99(ESALs)	344%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 32965480.73(ESALs)	650049,99(ESALs)	5071%
3	Aplastamiento en el tope de la capa subbase	Nf= 9536014.64(ESALs)	650049,99(ESALs)	1467%
	Fatiga afectiva en la fibra inferior de la capa subbase	Nf= 1172782.52(ESALs)	650049,99(ESALs)	180%
4	Deformación permanente en la subrasante	380174538.03(ESALs)	650049,99(ESALs)	58484%

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor mayor de Mr (wop-2(1)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 170396.40(ESALs)	650049,99(ESALs)	26%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 98151.44(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
3	Ruptura por corte en capa subbase	Nf= 432580.75(ESALs)	650049,99(ESALs)	67%
4	Deformación permanente en la subrasante	Nf= 90362454.49(ESALs)	650049,99(ESALs)	13901%

Nº	Estructura de pavimento con subbase suelo cemento con valor intermedio de Mr (wop(1)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 1923262.12(ESALs)	650049,99(ESALs)	296%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 25524341.40(ESALs)	650049,99(ESALs)	3927%
3	Aplastamiento en el tope de la capa subbase	Nf= 9176067.12(ESALs)	650049,99(ESALs)	1412%
	Fatiga afectiva en la fibra inferior de la capa subbase	Nf= 1589980.30(ESALs)	650049,99(ESALs)	245%
4	Deformación permanente en la subrasante	2362508542.63(ESALs)	650049,99(ESALs)	363435%

Se considera la mejor opción de diseño de estructura de pavimento, considerando la humedad óptima de diseño -2 (wop-2).

Como también se observa que para un pavimento que presenta espesores prácticamente estándar se tiene % de vida útil relativamente aceptable, pero con la incorporación de una capa de suelo cemento este % de vida útil tiene una considerable mejora, considerando que el espesor de suelo cemento es 15 cm y el espesor de capa sub base estándar de 20 cm se considera aceptable el uso ya que al reducir el volumen de movimiento de tierras se gana tanto tiempo y dinero, como también se obtiene mayor vida útil al esperado.

### CONCLUSIONES

- En las metodologías de obtención de módulo resiliente, queda verificado que el método empírico no es una opción segura ya que no representa ningún parámetro de esfuerzo – deformación ni ningún otro necesario para el diseño de una estructura de pavimento. Por otro lado el método experimental que corresponde al ensayo triaxial dinámico de carga repetida, se encuentra bajo la norma AASHTO T 307 – 99 “Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials”, determina todos los parámetros de esfuerzos y deformaciones requeridos para cualquier diseño de estructura de pavimento.
- Se puede apreciar que con la ayuda del Everstress y el análisis de diseño se puede realizar varios modelos de pavimentos, pudiendo de esta manera llegar al modelo óptimo para afrontar la vida de servicio requerido.

- Los resultados obtenidos del análisis de la estructura de pavimento tradicional en ambas muestras A-2-4 y A-2-6, presenta poco porcentaje de vida útil en capa asfáltica, base y sub base, en la subrasante mejora la vida útil, no es suficiente solo tomar en cuenta la subrasante todas las capas cumplen una función en la estructura de pavimento y se debe lograr el porcentaje de vida adecuado respecto al número de ejes equivalentes de diseño necesario para que la estructura se mantenga sin problemas.
- El análisis de la estructura de pavimento de subbase mejorada con cemento, tanto en la muestra A-2-4 como la muestra A-2-6 aumenta significativamente, el porcentaje de vida útil en la capa asfáltica, capa base y subbase presentando resultados de vida útil por encima del número de ejes equivalentes de diseño. Los resultados de vida útil de la subrasante con módulos resilientes obtenidos de contenido de humedad baja, media y alta, presentan resultados de vida útil sobrepasando el número de ejes equivalente de diseño.
- El punto más importante e influyente en esta investigación es el papel que juega el contenido de humedad en dos diferentes muestras, las cuales si bien parecen semejantes, presentan comportamiento muy diferentes al contenido de humedad adicionado, de este modo se pudo verificar que la curva de densidad seca máxima y porcentaje de humedad óptimo no siempre es el correcto durante la ejecución de una obra, en algunos casos con esta muestra A-2-6 se podría realizar la compactación al lado seco a diferencia de la muestra A-2-4 que si presenta buen comportamiento a una densidad seca máxima y porcentaje de humedad óptimo.

De acuerdo a lo expuesto en el presente estudio se recomienda:

- Incluir el ensayo de módulo resiliente en todos los estudios geotécnicos realizados para diseños de pavimentos en Bolivia.
- Implementar el equipo triaxial cíclico en los laboratorios de geotecnia de Universidades, instituciones encargadas de ejecución y supervisión de obras viales, Empresas constructoras, etc.
- El costo-beneficio de realizar ensayos de módulo resiliente en suelos de subrasante y capas de base y subbase son necesarios ya que se obtiene de manera eficiente los resultados y valores para el análisis de diseño, sin recurrir de manera constante al empirismo.
- Complementar el estudio con ensayos de módulo resiliente en bancos de préstamo para tener un dato real de material de cantera utilizable en base y sub base.
- Regularizar el uso del ensayo de capacidad de soporte CBR ya que no se puede seguir usando este dato como método para obtención de módulo resiliente.

## BIBLIOGRAFÍA

- Zapata C.E., Andrei D., Witczak M.W. y Houston W.N. (2007). "Incorporation of environmental effects in pavement design", *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 8, No. 4, pp. 667-693.
- Monismith, Carl, 2004. Evolution of Long-Lasting Pavement Design Methodology: A Perspective. Distinguished Lecture, Proceedings, International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements, Auburn University, June 7-9, 2004.
- Garnica Anguas, P. (2004). Módulos de resiliencia de agregados provenientes de rocas altamente intemperizadas, (256), 106.
- Heukelom W. and Foster (1960) "Dynamic Testing of Pavement" ASCE, *Journal of the Structural Division*, N°.SM 1, 86.
- Adama D. et al., (2014). – " Implementation of Resilient Modulus – CBR relationship in Mechanistic – Empirical (M-E) Pavement Desing", *CAMES – Sciences Appliquees et de l'Ingéniur*, V1(2), pp.6571.
- Green, J.L. and Hall, J.W. (1975), "Non- destructive vibratory testing of airport pavement :Experimental tests results and development of evaluation methodology and procedure", FAA-RD-73-205, Federal Aviation Administration, Washington D.C.
- AASHTO, (2017)."Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials" WSDOT Materials Manual M 46-01.27.
- COOPER TECHNOLOGY (2010) "Servo – Pneumatic Universal Testing Machine User Manual", CRT-UTM-NU.
- AASHTO, (1992)."Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Sub-base Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P46". AASHTO Designation: T294-92 I, Interim Specification 1992.

# INGENIUM



# Evaluación probabilística del riesgo de inundaciones bajo escenarios de cambio climático en una cuenca de los Cintis - Chuquisaca

Zapata, R.<sup>a</sup>, Hernández, C.<sup>b</sup>, Fernández, S.<sup>c</sup>, Flores, M.<sup>d</sup>, López, N.<sup>e</sup>, Choque, D.<sup>f</sup>

<sup>a</sup> Investigador en el área de recursos hídricos del Instituto de Aguas de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: zapata.ronald@usfx.bo

<sup>b</sup> Docente en el área de recursos hídricos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: hernandez.corina@usfx.bo

<sup>c</sup> Estudiante de posgrado en el área de recursos hídricos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: sergio.fernandezm9@gmail.com.

<sup>d</sup> Estudiante de posgrado en el área de recursos hídricos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: mauricioflores971@gmail.com.

<sup>e</sup> Estudiante de posgrado en el área de recursos hídricos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: nikyloppad29@gmail.com

<sup>f</sup> Estudiante de posgrado en el área de recursos hídricos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: daynoryeisonchoqueorias@gmail.com.

Recibido: 06/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Publicado: 10/11/2024

## RESUMEN

La evaluación del riesgo de inundación en la cuenca de estudio, basada en un enfoque probabilístico y en escenarios de cambio climático, revela un incremento notable en la frecuencia y magnitud de los eventos extremos. Mediante la generación de tormentas estocásticas y el uso de modelos hidráulicos como HEC-HMS y HEC-RAS, se estimaron los impactos de las inundaciones en periodos de retorno de 50 y 100 años, los resultados muestran que las áreas más expuestas son las zonas bajas, con infraestructuras críticas y cultivos susceptibles a daños significativos; el análisis de vulnerabilidad, realizado con el software CAPRA-GIS, proyecta pérdidas económicas considerables, subrayando la necesidad de reforzar infraestructuras defensivas y mejorar los sistemas de alerta temprana para mitigar los efectos del cambio climático en esta región clave de Bolivia.

**Palabras clave:** Riesgo de inundación, cuenca del Río Chico, cambio climático, vulnerabilidad, análisis probabilista.

## ABSTRACT

The flood risk assessment in the studied basin, based on a probabilistic approach and climate change scenarios, reveals a significant increase in the frequency and magnitude of extreme events. Through the generation of stochastic storms and the use of hydraulic models such as HEC-HMS and HEC-RAS, the impacts of floods were estimated for 50- and 100-year return periods. The results show that the most exposed areas are the lowlands, where critical infrastructure and crops are highly vulnerable to significant damage. The vulnerability analysis, carried out using CAPRA-GIS software, projects considerable economic losses, highlighting the need to reinforce defensive infrastructure and improve early warning systems to mitigate the effects of climate change in this key region of Bolivia.

**Key words:** channel type spillways, two-dimensional physical / numerical hydraulic modeling

## INTRODUCCIÓN

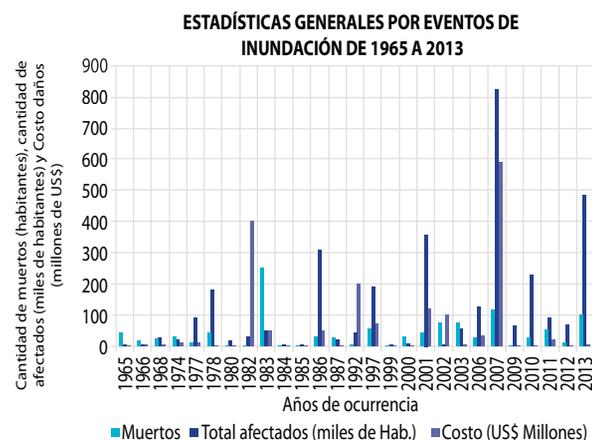
Las inundaciones son uno de los fenómenos naturales más frecuentes y costosos, afectando regiones a nivel mundial, especialmente en áreas vulnerables al cambio climático. En los últimos años, ha habido un incremento en la frecuencia e intensidad de estos eventos debido a factores como la expansión de asentamientos humanos y el uso intensivo de zonas propensas a inundaciones, así como cambios en los patrones de precipitación asociados al calentamiento global (Keating et al., 2014; Arnell & Gosling, 2016). En este contexto, se espera que el cambio climático incremente tanto la magnitud como la frecuencia de las inundaciones en varias regiones, incluyendo Bolivia, lo que plantea retos significativos para la gestión del riesgo y la protección de las comunidades vulnerables.

En Bolivia, las inundaciones han sido particularmente devastadoras, con eventos recientes que han afectado tanto las áreas urbanas como rurales, dañando infraestructuras, viviendas y áreas agrícolas. Entre 1965 y 2013, se reportaron 37 eventos de inundaciones significativos con pérdidas económicas cercanas a los 2 mil millones de dólares, afectando a más de 3 millones de personas y cobrando la vida de aproximadamente 1,000 individuos (BID, 2016). Este panorama sugiere la urgente necesidad de integrar modelos robustos para la evaluación del riesgo y la implementación de medidas de mitigación a nivel local y regional.

En los últimos años, Bolivia ha sido catalogada como una de las naciones más vulnerables a los desastres naturales, incluidos los eventos de inundación, exacerbados por la deforestación y el uso inadecuado de la tierra; entre 2000 y 2020, Bolivia registró 632 eventos de inundaciones que afectaron a más de 2 millones de personas y causaron la muerte de 289 personas, según el SNATD (2020, estos eventos ocurrieron principalmente entre diciembre y marzo, afectando principalmente al altiplano y la Amazonía. La inundación más grave fue en 2007, con 540,000 personas afectadas y 67 muertes, la evolución temporal de las inundaciones en Bolivia desde 1965 hasta 2013 y destacan los diez eventos más severos entre 2000 y 2020.

Estudios indican que, con el cambio climático, el país podría experimentar precipitaciones más extremas, incrementando los riesgos para las infraestructuras y la economía (Freeman & Warner, 2001; Kemfert, 2005). La necesidad de desarrollar estrategias para la gestión sostenible de los recursos hídricos, junto con sistemas de alerta temprana, es crucial para reducir los impactos de las inundaciones en las comunidades más vulnerables.

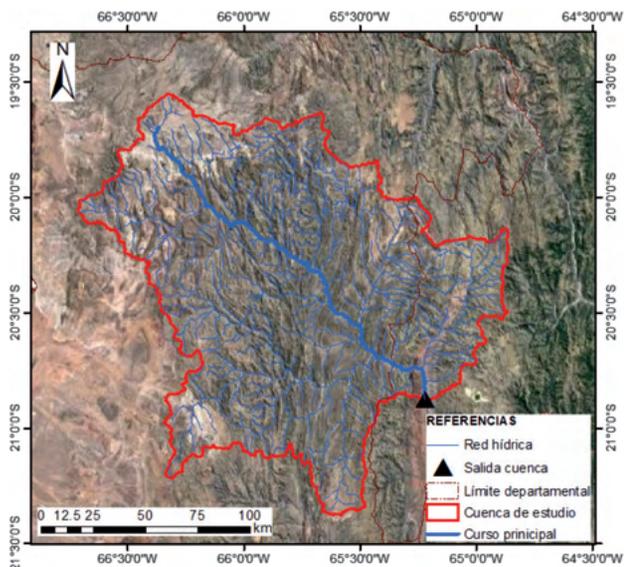
**Figura 1.** Eventos de inundaciones desde 1965 hasta 2013



Fuente: Adaptado de SNATD (2020)

## DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca de estudio tiene una extensión de 20915.21 Km<sup>2</sup>. Hidrográficamente se encuentra en el área de la macrocuenca del Río de la Plata y de la Cuenca del Río Pilcomayo, del que es afluente principal el Río Tumusla, clasificada como cuenca menor; entre las principales fuentes de agua, están los ríos de caudal permanente y temporal, las quebradas, las vertientes y aguas subterráneas; estas últimas son aprovechadas principalmente para consumo humano y animal.

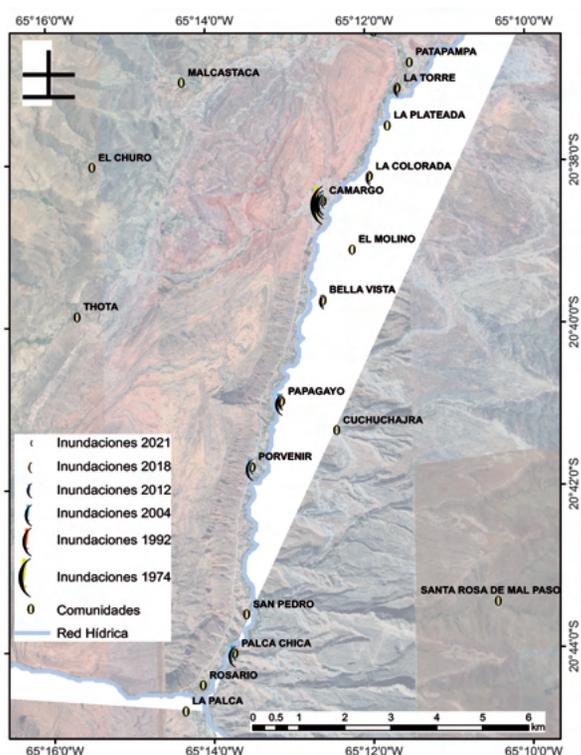


**Figura 2.** Cuenca de estudio e infraestructura de protección

Inventario de eventos de inundación en el municipio de Camargo

De acuerdo a la información recopilada de la base de datos del desinventar para el municipio de Camargo, además de la plataforma del VIDECL para riesgos de desastres en Bolivia y medios de prensa nacional del país, se han identificado un total de 5 tipos de amenazas en la región, siendo las de mayor recurrencia los eventos de inundación y granizada; y las de menor recurrencia las amenazas de Lluvias intensas, Heladas y Sequías.

Las comunidades con mayores eventos de inundación registrados son las de Camargo, Papagayo y La Torre, presentándose más de 3 eventos de inundación en cada una de ellas. El evento registrado con mayor daño causado fue el del año 2004, que afectó a varias comunidades de la región. En el mapa de la figura 6 se muestra la recurrencia de eventos de inundación por comunidades afectadas a lo largo del río Chico y río Grande del municipio de Camargo.



**Figura 3.** Mapa de espacialidad de la recurrencia de inundación por comunidad

La recurrencia de los eventos de inundación en la zona se ha dado cada cuatro años, siendo los últimos eventos más severos que los anteriores por el número de damnificados y pérdidas de cultivos registradas en la zona.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología para la evaluación probabilista del riesgo por inundación

En este estudio se eligió la metodología CAPRA para la evaluación del riesgo de inundaciones debido a

sus ventajas sobre otros métodos, ya que permite la evaluación del riesgo tanto determinista como estocástico mediante la generación de escenarios estocásticos de lluvia (Rincón, D. et al, 2022, Torres M.A. et al, 2013; ERN-AL, 2009. A continuación, se describen los pasos considerados.

### Amenaza de lluvia

#### Disponibilidad de la información pluviométrica

Se recopiló información pluviométrica de la plataforma INADHI del SENAMHI, que proporcionó datos históricos mensuales y diarios de precipitación. Se utilizó ArcGis 10.4 para mapear la ubicación de las estaciones, empleando archivos vectoriales (.shp) que incluyeron cuencas, redes hídricas y estaciones. La base de datos abarcó estaciones históricas, automáticas con tecnología GPRS y con datos satelitales. Posteriormente, se aplicaron criterios de selección, considerando estaciones dentro de la cuenca con más de 15 años de registros completos, estaciones convencionales o automáticas (excluyendo datos satelitales), y estaciones fuera de la cuenca con suficiente cantidad de datos, cercanía al perímetro de la cuenca y una variación altitudinal de  $\pm 500$  metros respecto a la altitud media de la cuenca.

#### Análisis de la calidad de los datos

**Evaluación visual de series cronológicas:** Este proceso incluyó la revisión de oscilaciones en los registros a lo largo del tiempo y la detección de periodos con datos idénticos, que podrían ser indicativos de errores sistemáticos o aleatorios en la recolección de datos.

**Evaluación de outliers o datos atípicos:** La evaluación de datos atípicos se realizó siguiendo la Guía de Balance Hídrico de Bolivia (1980-2020) y el enfoque del rango intercuartílico (RI), comúnmente utilizado en datos climáticos. Para este estudio, los umbrales de valores atípicos fueron definidos con la fórmula  $U_{max} = q75 + f \cdot (q75 - q25)$ , donde  $f$  es un factor multiplicador ajustable.

Donde  $q25$  es el primer cuartil,  $q75$  es el tercer cuartil, y  $f$  es un factor multiplicador definido por el usuario. El  $U_{min}$  es el umbral mínimo del cual los datos menores a dicho valor son considerados como sospechosos. El  $U_{max}$  es el umbral máximo del cual los datos mayores a dicho valor son considerados como sospechosos.

#### Análisis de regionalización y homogeneización

Se aplicó el método del vector regional para evaluar la homogeneidad de las series de precipitación. El análisis se realizó mediante la creación de un vector de referencia (índice anual) que representa la tendencia de cada región, considerando las estaciones ficticias para verificar la homogeneidad temporal y espacial.

## Relleno y reconstrucción de series temporales de precipitación

Se aplicó el Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), utilizando el paquete Climatology V3.1.1 en R, para completar las series de precipitación con datos faltantes, el método se basó en el enfoque de Paulhus y Kohler (1952), que utiliza promedios ponderados de estaciones cercanas, normalizados mediante la división por sus precipitaciones medias.

## Generación de curvas PADF y tormentas estocásticas

Por las características de la cuenca se seleccionó una duración de 5 días para la Cuenca del río Grande y río Chico.

## Construcción del modelo hidrológico

Para la simulación de los hidrogramas de crecidas en la cuenca de estudio, se utilizó el software HEC-HMS v 4.0 con el modelo de lluvia-escorrentía del hidrograma unitario del S.C.S. Este modelo se basa en el número de curva de escorrentía (CN) y pérdidas por infiltración, considerando umbrales de escorrentía como lo describen Chu y Steinman (2009). Este enfoque es ampliamente utilizado en hidrología debido a su simplicidad, robustez y precisión, especialmente en cuencas de Latinoamérica (Vega-Manganiello et al., 2015; Francisco-Nicolás et al., 2010).

Los datos de entrada para el modelo incluyeron: Área de la cuenca, tiempo de retardo (asumido como 0.6 del tiempo de concentración, SCS, 1972), número de curva de escorrentía (CN). Se utilizaron tormentas de diseño para periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años, ingresando la duración de la lluvia y el intervalo de tiempo según los criterios de distribución pluviométrica. La cuenca fue modelada con salidas comunes para simplificar la simulación, pero los caudales fueron calculados de manera individual para cada subcuenca.

## Amenaza de lluvia

El estudio se realizó utilizando el software IT-LluviaNH, desarrollado para el análisis probabilístico de la amenaza de lluvias no huracanadas. Este software permitió generar múltiples escenarios estocásticos de lluvia a partir de registros históricos de estaciones meteorológicas o imágenes satelitales, representando adecuadamente la amenaza en la zona de estudio (ITEC, 2018).

## Amenaza de inundación

Asimismo, se empleó el software IT-Inundación para el análisis de inundaciones, tanto fluviales como por desbordamiento. En el enfoque probabilístico, el software generó diferentes escenarios de caudal para un mismo periodo de retorno, considerando la variabilidad de la precipitación. En el enfoque determinista, se realizaron estimaciones de flujo basadas en curvas de periodo de retorno. Estos resultados se utilizaron como

datos de entrada en el software HEC-RAS, con el que se obtuvo información sobre la profundidad, velocidad y duración de cada escenario de inundación (ITEC, 2018).

## Metodología para la evaluación del riesgo

### Modelación hidráulica en HEC RAS

La modelación hidráulica en **HEC RAS** se empleó para evaluar el riesgo de inundación de manera precisa y detallada. La metodología aplicada incluyó los siguientes pasos:

Recopilación de datos: Se reunieron datos topográficos (elevaciones, pendientes) y datos hidrológicos (caudales, curvas de descarga) de la zona de estudio.

Topografía del cauce y planicie de inundación: Se utilizó información topográfica de alta resolución ( $\leq 1\text{m} \times 1\text{m}$ ), obtenida mediante levantamiento con estaciones totales, drones con cámaras fotogramétricas, LIDAR o imágenes satelitales. Esta precisión es fundamental debido a la evaluación de estructuras de defensa ribereña y otras infraestructuras expuestas a inundaciones.

Rugosidad del cauce y planicie de inundación: La rugosidad, expresada por el coeficiente de Manning o Darcy-Weisbach, se evaluó considerando las características del lecho del río y las planicies de inundación. Este valor, obtenido a partir de estudios y fotografías de canales típicos, se ajustó a las condiciones locales de los casos de estudio para asegurar la precisión en la modelación.

Este enfoque permitió una representación fiel del comportamiento hidráulico en la zona de análisis.

### Configuración de modelo hidráulico

La configuración del modelo hidráulico en HEC RAS debe configurarse con el método de flujo no estacionario (unsteady flow) el cual implica los siguientes pasos:

### Secciones transversales

#### Asignación de diques (Levees)

Generación de un plan de trabajo definiendo los siguientes parámetros de cálculo: Geometría con la interactuará el fluido. simulación de caudal no estacionario, post procesamiento, definición de fecha/ tiempo de inicio – final, intervalo computacional de cálculo, intervalo del hidrograma de salida, intervalo de salida detallado, opciones de control de convergencia

Parámetros del método de flujo no estacionario: En este apartado debe configurarse las condiciones de contorno del modelo hidráulico: seleccionar ubicación de condiciones de contorno, asignar una condición de contorno a las secciones correspondientes, asignar el hidrograma a la condición de contorno de entrada

## Calibración del modelo hidráulico

Para la calibración del modelo hidráulico en HEC RAS, se recopiló datos de campo y mediciones relevantes, incluyendo información topográfica, geometría de las estructuras, condiciones de flujo y rugosidad. Estos datos permitieron que el modelo base reflejara de manera precisa las características del área de estudio.

Se simuló el modelo hidráulico inicial y se compararon los resultados con los datos observados en campo.

Este paso identificó discrepancias entre los valores simulados y los medidos, especialmente en términos de tirante y velocidad del flujo.

Luego, se ajustaron los parámetros del modelo, tales como la rugosidad del cauce y la elevación del fondo, para reducir las diferencias encontradas. Una vez realizado el ajuste, se volvió a simular el modelo con los parámetros modificados y se evaluó la precisión de los resultados en comparación con los datos reales.

Finalmente, se validó el modelo ajustado mediante pruebas con diferentes condiciones de flujo, asegurando que el modelo calibrado pudiera replicar con precisión las características hidráulicas de la zona en diversas situaciones.

## Componente de exposición

### Información requerida

El componente de exposición consistió en levantar una base de datos sobre los elementos expuestos en el tramo de análisis seleccionado. Esta información fue recopilada mediante imágenes satelitales y trabajo de campo, complementada por datos de catastros y límites territoriales, materiales de viviendas (mampostería, madera, adobe), áreas agrícolas y verdes, ubicación de vías y puentes, principales unidades sociales, y obras de protección como defensas ribereñas.

La recopilación de esta información fue clave para analizar la exposición de los elementos ante la amenaza de inundaciones, lo que permitió evaluar el grado de contacto de los componentes con el peligro y su vulnerabilidad frente a posibles daños.

### Exposición de los componentes

En el caso específico de las cuencas del Río Chico y Río Grande, se evaluaron los factores de exposición y vulnerabilidad.

Estos análisis permitieron definir medidas de prevención y mitigación, como la construcción de sistemas de drenaje, la elevación de edificaciones, y la creación de sistemas de alerta temprana y planes de evacuación.

El análisis de exposición se actualizó de manera continua para asegurar la relevancia de las estrategias

de prevención frente a cambios en las condiciones ambientales y socioeconómicas (Figura 3).

## Evaluación de vulnerabilidad

### Información requerida

Se recopiló información sobre elementos físicos como infraestructuras, muros, cultivos y ganadería en las zonas críticas. Estos elementos fueron identificados como los más vulnerables ante la amenaza de inundación.

### Tipificación de los elementos

#### Tipificación de infraestructura:

Se evaluaron parámetros de las edificaciones tales como uso, estado, materiales de construcción (muros, cubiertas, pisos), número de pisos, altura entre pisos, y cantidad de habitantes. Utilizando el software ERN-vulnerabilidad V2.0, se aplicaron funciones específicas de vulnerabilidad basadas en el tipo de edificación y su exposición a las inundaciones, ajustando los resultados con parámetros como fracción de altura y porcentaje de daño estimado.

#### Tipificación de cultivos:

Se definieron funciones de vulnerabilidad para diferentes tipos de cultivos, considerando sus características y sistemas de riego. Los parámetros evaluados incluyeron la altura de los cultivos, fracción de altura, porcentaje de daño estimado y curvatura de vulnerabilidad, aplicando el programa ERN-vulnerabilidad V2.0.

### Funciones de curva de vulnerabilidades según la tipificación de los componentes

**Infraestructura:** Se establecieron curvas de vulnerabilidad para diferentes tipos de edificaciones, dependiendo del material de construcción y el número de pisos.

**Muros:** Se identificaron las vulnerabilidades de los muros de protección, categorizándolos en muros de mampostería de piedra, hormigón ciclópeo y gaviones.

**Cultivos:** Se desarrollaron curvas específicas para diferentes tipos de cultivos, como uva, durazno, maíz, cereales y hortalizas.

**Ganadería:** La ganadería también fue evaluada en términos de vulnerabilidad, con curvas específicas para bovinos, caprinos, ovinos, porcinos y avicultura.

### Metodología de evaluación probabilista de riesgo

La metodología de evaluación probabilista de riesgo, según la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), define el riesgo de desastres como la posibilidad de muertes, lesiones o daños en activos dentro de un sistema o comunidad, determinado por la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta (UNDRR, 2017).

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) indica que el módulo de riesgo integra los componentes de amenaza, exposición y vulnerabilidad, y destaca la importancia de evaluar la incertidumbre, que se clasifica en:

**Incetidumbre natural o aleatoria:** Inherente a la variabilidad de los procesos naturales.

**Incetidumbre epistémica:** Derivada de la falta de conocimiento sobre el sistema evaluado.

La elección del método de análisis de riesgo depende de las necesidades específicas del proyecto, considerando factores como la disponibilidad de datos y modelos, limitaciones de tiempo y recursos, y el nivel de detalle requerido (BID, 2019).

La evaluación probabilista aborda incertidumbres inherentes al riesgo de desastres, como la limitada disponibilidad de datos históricos y la infrecuencia de eventos catastróficos (ERN-AL, s.f. a). Esta metodología modela probabilísticamente los componentes del riesgo y utiliza eventos estocásticos para calcular daños esperados y sus probabilidades, propagando las incertidumbres.

El resultado es una distribución de probabilidades de pérdidas, de la cual se derivan métricas de riesgo como la curva de excedencia de pérdidas (CEP), la pérdida anual esperada (PAE) y las pérdidas máximas probables (PMP). Para más información, se puede consultar la Plataforma CAPRA (Evaluación Probabilística del Riesgo).

### Cálculo numérico básico

El riesgo por amenazas naturales es comúnmente descrito mediante la curva de excedencia de pérdidas ("loss curve") que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en que se excedan un valor especificado de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia o tasa de excedencia puede calcularse mediante la siguiente ecuación, que es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total:

Donde:

$v(p)$  = tasa de excedencia de la pérdida  $p$

$F_A(\text{Evento } i)$  = frecuencia anual de ocurrencia del evento  $i$

$Pr(P > p | \text{Evento } i)$  = probabilidad de que la pérdida sea superior a  $p$ , dado que ocurrió el  $i$ -ésimo evento.

La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos potencialmente dañinos. El inverso de  $v(p)$  es el periodo de retorno de la pérdida  $p$ , identificado como  $T_r$ .

La pérdida  $p$  a que se refiere la ecuación anterior es la suma de las pérdidas que acontecen en todos los elementos expuestos.

### Incetidumbres

Generalmente es impráctico determinar de manera directa la distribución de probabilidad de la pérdida en un bien expuesto condicionada a la ocurrencia de un escenario. Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida  $p$ , dado que ocurrió un evento, suele expresarse de la siguiente manera:

Donde:

$Pr(P > p | I)$  = probabilidad de que la pérdida exceda el valor  $p$  dado que la intensidad local fue  $I$

$f(I | \text{Evento})$  = densidad de probabilidades de la intensidad condicionada a la ocurrencia del evento

### Estimadores puntuales del riesgo

La curva calculada aplicando la ecuación para la curva de excedencia de pérdidas ("loss curve") tiene toda la información necesaria para caracterizar el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas. Sin embargo, en ocasiones es impráctico utilizar una curva completa, por lo que conviene utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo con un solo número.

Se presentan a continuación los dos estimadores puntuales comúnmente utilizados.

**Pérdida anual esperada (PAE):** se trata del valor esperado de la pérdida anual. Es una cantidad importante puesto que indica, por ejemplo, que si el proceso de ocurrencia de eventos dañinos fuera estacionario de aquí a la eternidad, su costo equivaldría a haber pagado la PAE cantidad anualmente. Por tanto, en un sistema simple de seguro, la pérdida anual esperada sería la prima pura anual justa. La PAE puede obtenerse por integración de  $v(p)$  o mediante la siguiente expresión:

**Pérdida máxima probable (PML** por las iniciales en inglés de Probable Maximum Loss): se trata de una pérdida que ocurre con muy poca frecuencia. No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir "muy poca frecuencia". De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la aversión al riesgo de quien la está tomando. Para el caso de análisis de inundaciones no es usual en general realizar análisis para periodos de retorno de más de 200 o 250 años ya que en general los fenómenos hidrometeorológicos son más recurrentes, es decir, se repiten entre cada veinte o cincuenta años.

Escenarios de Cambio Climático en la Estimación del Riesgo Probabilista de Inundación

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático define el cambio climático como aquel cambio atribuido a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera, sumándose a la variabilidad natural del clima. El Panel Intergubernamental de

Expertos en Cambio Climático (IPCC) señala que el cambio climático se manifiesta a través de cambios en la media y/o la variabilidad de las propiedades climáticas, persistiendo por periodos prolongados, típicamente décadas o más.

### Modelos de Circulación Global (GCMs)

Los GCMs son herramientas que simulan los procesos físicos de la atmósfera, océano, criosfera y superficie terrestre de manera acoplada, aunque no pueden abordar fenómenos de menor escala como la orografía y la convección. Estos modelos son la principal fuente de información para predecir el clima a largo plazo, generando series a partir de algoritmos matemáticos que representan las dinámicas del sistema climático.

A pesar de su utilidad, los GCMs presentan limitaciones en la representación de atributos climáticos locales, dado que su resolución espacial horizontal varía entre 1 y 3 grados (aproximadamente 40 a 120 km en el ecuador). Por ello, es fundamental desarrollar proyecciones climáticas a escala reducida para evaluar los impactos locales en los recursos hídricos.

### CMIP6

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) ha mejorado la comprensión del clima pasado, presente y futuro. Las fases más recientes, CMIP5 y CMIP6, han mejorado las simulaciones del clima global, aunque aún presentan sesgos sistemáticos, especialmente en las precipitaciones. Para el análisis, se emplearon datos de 10 GCMs del CMIP6, complementados con otros 7 modelos para una mejor evaluación del desempeño en diferentes zonas con variados patrones pluviométricos.

### Escenarios de Cambio Climático

El sexto informe del IPCC evalúa cinco escenarios que ilustran posibles evoluciones de las fuerzas impulsoras del cambio climático. Estos escenarios incluyen emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) altas, intermedias y bajas, con predicciones de incremento de precipitaciones en latitudes altas y reducción en subtropicales. La evaluación sugiere que el escenario más crítico para eventos extremos en Bolivia es el SSP5 (8.5).

### Análisis del Desempeño de los GCMs

Para identificar el GCM que mejor representa las características pluviométricas locales, se evaluaron cinco indicadores estadísticos. La delimitación temporal se centró en el escenario SSP5-8.5, considerado crítico por el aumento de emisiones de GEI. Las series históricas de 1980 a 2015 se usaron como referencia para los periodos 2021-2060 y 2061-2100.

### Reducción de Escala (Downscaling)

Las técnicas de reducción de escala buscan asociar las salidas de los GCM con condiciones meteorológicas locales.

Entre las técnicas, el Quantile Mapping ha demostrado ser efectivo, transformando las funciones de distribución de variables modeladas en observadas. Este método no paramétrico utiliza la relación cuantil-cuantil para alinear las distribuciones acumulativas de series temporales observadas y simuladas.

### Probabilidad de excedencia de valores de pérdida

La curva de pérdidas,  $v(p)$ , indica con qué frecuencia ocurrirán eventos que producirán pérdidas iguales o superiores a una dada,  $p$ . Si suponemos que el proceso de ocurrencia de eventos en el tiempo obedece a un proceso de Poisson, entonces es posible calcular la probabilidad de que la pérdida  $p$  sea excedida en un lapso  $T$ , es decir, en los próximos  $T$  años, con la siguiente expresión:

Donde:

$P_e(p,T)$  = probabilidad error de que la pérdida  $p$  sea excedida en los próximos  $T$  años.

### Análisis del riesgo por inundación

El análisis del riesgo por inundación es un proceso que se utiliza para evaluar el nivel de peligro que representan las inundaciones en un área determinada.

El objetivo principal es identificar las posibles amenazas de inundación y evaluar la vulnerabilidad de los bienes y personas que se encuentran en esa zona.

Este análisis implica la identificación de las áreas de riesgo, la evaluación de la vulnerabilidad, la evaluación de la amenaza y el análisis del riesgo en sí. Al analizar el riesgo, se deben considerar factores como la probabilidad de que ocurra una inundación, el grado de impacto que tendría en la zona afectada y la eficacia de las medidas de mitigación y preparación que se podrían implementar.

### Evaluación del riesgo

Existe un amplio consenso de que una de las estrategias más efectivas para la reducción del riesgo es la planificación, en la medida en que intenta ubicar a la población, la infraestructura física y las actividades económicas en zonas aptas para cada tipo de actividad, de acuerdo con las capacidades y características del territorio. Es por ello que su adecuada interpretación y representación es de vital importancia.

La evaluación del riesgo se lleva a cabo mediante la asociación de las amenazas consideradas sobre el inventario de activos expuestos con las funciones de vulnerabilidad relacionadas.

Para el efecto se emplea la herramienta de evaluación de riesgo CAPRA-GIS. Se evalúa, entonces, el porcentaje de daños esperado en cada una de las edificaciones y zonas de cultivo expuestas para cada uno de los escenarios planteados y para el análisis probabilista integral. La valoración del riesgo se presenta en términos de:

- Porcentaje de afectación física de las construcciones.
- Pérdidas anuales esperadas aproximadas por predio.
- Pérdidas económicas máximas probables para el portafolio de construcciones.
- Pérdidas y porcentaje de daño esperado para escenarios específicos.
- Pérdidas económicas esperadas y máximas probables en zonas de cultivos.

## RESULTADOS

### Análisis de información hidroclimática

Se seleccionaron 29 estaciones dentro y fuera de la cuenca del río Chico y río Grande (Camargo), de acuerdo con los criterios descritos en la tabla 4. Todas las estaciones seleccionadas provienen de las estaciones terrestres del INADHI-SENAMHI.

De las 29 estaciones, el 52% (15 estaciones) cuenta con más de 30 años de registros completos, el 28% (8 estaciones) tiene entre 20 y 30 años de información, y el 20% (6 estaciones) posee entre 15 y 20 años de registros completos. Entre las estaciones con mayor antigüedad se encuentran Yocalla (C29), Vitichi (C28), Uyuni (C26), Tupiza (C25), Potosí Los Pinos (C16), Oploca (C12), y El Puente (C08), que comenzaron sus registros en 1942, lo que representa aproximadamente 80 años de datos.

La altitud de estas estaciones varía entre 2,176 msnm y 3,950 msnm, mientras que la precipitación media multianual oscila entre 196.4 mm y 707.8 mm. En la tabla 14 se detallan las características de cada estación, incluyendo su ID, coordenadas, precipitación media anual, y los años de registros completos. El mapa de la figura 20 muestra la ubicación de las estaciones dentro de la cuenca del río Chico y río Grande, con un total de 14 estaciones dentro de la cuenca.

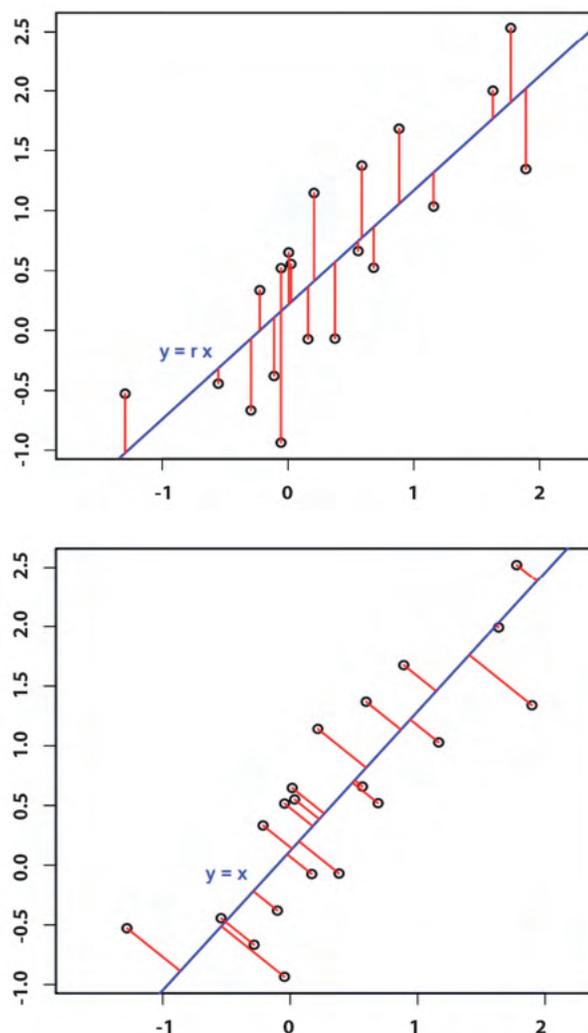
La disponibilidad de información a escala diaria se presenta gráficamente en la figura 21, donde se puede observar el comportamiento de las estaciones entre 1980 y 2020. Para identificar y corregir datos atípicos, se aplicó un proceso metodológico, que se describe en el esquema de la figura 7. Se realizaron análisis separados para cada caso de estudio y se identificaron siete grupos de estaciones con características pluviométricas y altitudinales similares.

Después de calcular los umbrales máximos, se identificaron los valores atípicos que excedían los límites

establecidos para cada estación. Estos valores fueron comparados con los datos de otras estaciones del mismo grupo para verificar similitudes en magnitud y temporalidad. En los casos en los que no se encontraron similitudes, se procedió a eliminar los datos atípicos.

Finalmente, la regionalización de las estaciones se realizó en un solo análisis que cubrió las tres áreas de estudio, identificando tres regiones homogéneas en función de la pluviometría. La primera región incluye estaciones con una precipitación anual entre 200 y 300 mm, y un coeficiente de correlación superior a 0.65. La segunda región se caracteriza por precipitaciones superiores a 500 mm, típicas de zonas de valle, con un coeficiente de correlación mayor a 0.7. La tercera región tiene precipitaciones anuales entre 300 y 500 mm, con un coeficiente de correlación superior a 0.6.

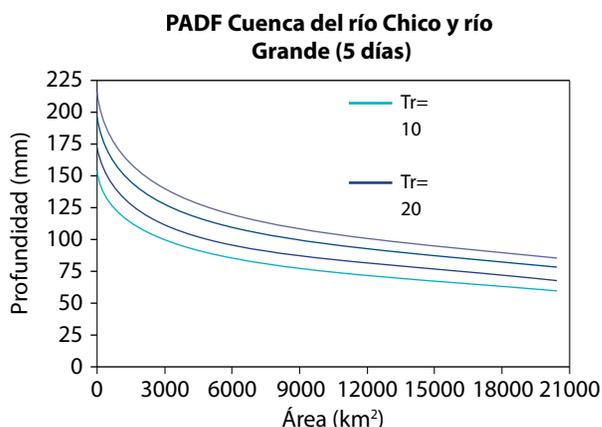
Los resultados de los índices anuales del vector regional se muestran en varias gráficas, reflejando las características de cada región homogénea.



**Figura 4.** En rojo, desviaciones de la recta de regresión lineal (azul) minimizadas por mínimos cuadrados en los modelos I (izquierda) y II (derecha).

### Generación de curvas PADF y tormentas estocásticas

La generación de curvas PADF y tormentas estocásticas de lluvia se realizó utilizando el software IT-LluviaNH, el cual permite obtener una serie de eventos estocásticos que en conjunto representan la amenaza de lluvia en cada una de las cuencas de análisis.



**Figura 5.** Curvas PADF para 5 días de duración - Cuenca de estudio

### Resultados de modelo hidrológico

Los resultados del modelo hidrológico mostraron que, para la cuenca, los caudales máximos estimados variaron entre 1375.52 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 10 años y 2446.9 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 100 años.

El modelo proporcionó resultados satisfactorios en términos de consistencia y comparación con datos históricos de la región. Estos resultados son coherentes con la literatura que respalda la validez del método en cuencas con áreas comprendidas entre 0.5 y 250 km<sup>2</sup> (García y Conesa, 2011), confirmando su aplicabilidad en el contexto local.

Los caudales resultantes se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Caudales de crecida máxima en las cuencas

Estado de carga	Periodo de retorno	Avenida Máxima
	T (años)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Estado 1	10	1375.52
Estado 2	20	1879.6
Estado 3	50	2146.2
Estado 4	100	2446.9

### Resultados de la modelación hidráulica

La modelación hidráulica se realizó mediante el método de flujo no estacionario, lo que permitió una simulación efectiva del comportamiento del flujo en el cauce del río. Este enfoque es crucial para entender cómo el agua se comporta bajo diferentes condiciones hidrológicas.

Uno de los aspectos más destacados de los resultados es la utilización de una topografía detallada con una resolución de 0.40 m x 0.40 m. Esta alta resolución es fundamental, ya que garantiza que la geometría del terreno y del cauce se represente con precisión, lo que a su vez impacta directamente en la calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos. La correcta representación del terreno es esencial para predecir con exactitud los flujos y niveles de agua durante eventos de inundación.

El análisis de las características hidráulicas del modelo mostró que se establecieron distancias adecuadas entre las secciones transversales, orientándolas de manera perpendicular al flujo. Esta configuración optimiza la recolección de datos y mejora la exactitud en la simulación, permitiendo capturar variaciones en el comportamiento del flujo de manera más efectiva. Además, se consideró la amplitud de estas secciones para evaluar potenciales desbordamientos, un factor crítico en la gestión del riesgo de inundaciones.

La asignación de diques en las elevaciones topográficas se realizó con un enfoque cuidadoso, identificando las obras de defensa ribereña y los puntos de desborde. Esta estrategia no solo contribuyó a la precisión del modelo, sino que también permitió adoptar un carácter cuasi-bidimensional, integrando el efecto de desbordamiento del flujo hacia las áreas adyacentes. Este aspecto es fundamental para comprender cómo el flujo puede afectar las zonas aledañas en caso de inundaciones.

Para la entrada de caudales, se utilizaron hidrogramas que se cargaron en formato "DSS", lo que facilitó la simulación de flujos no uniformes. La capacidad de manejar hidrogramas en este formato es una ventaja significativa, ya que permite una flexibilidad en el análisis de diferentes escenarios de inundación. Finalmente, el coeficiente de rugosidad de Manning fue ajustado a 0.027 para el lecho del río y a 0.032 para los márgenes. Estos valores se determinaron con base en las características del material gravoso presente en el área de estudio. La correcta asignación de estos coeficientes es crucial, ya que influyen directamente en la velocidad y el comportamiento del flujo en el modelo.

Se calibró el coeficiente de rugosidad (n) en el modelo hidráulico, variando este parámetro para que los tirantes simulados se asemejaran a los tirantes observados.

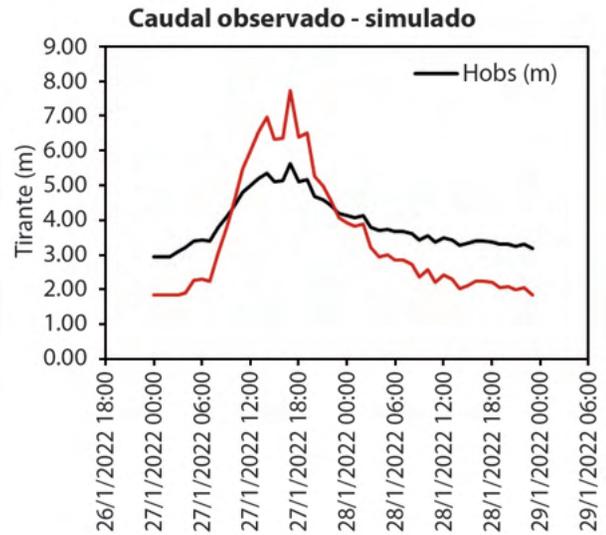
Los gráficos comparativos entre las curvas de tirantes observados y simulados mostraron un comportamiento similar, aunque no se superpusieron completamente. Esta similitud es crucial, ya que indica que el modelo

puede replicar adecuadamente el comportamiento del flujo en eventos de inundación.

Las curvas de tirantes reflejaron una distribución temporal considerablemente cercana, lo que sugiere que el modelo simula correctamente la dinámica del flujo a lo largo del tiempo. Se obtuvieron parámetros estadísticos que indican una adecuada similitud entre los tirantes observados y simulados, validando la efectividad de la calibración del modelo.

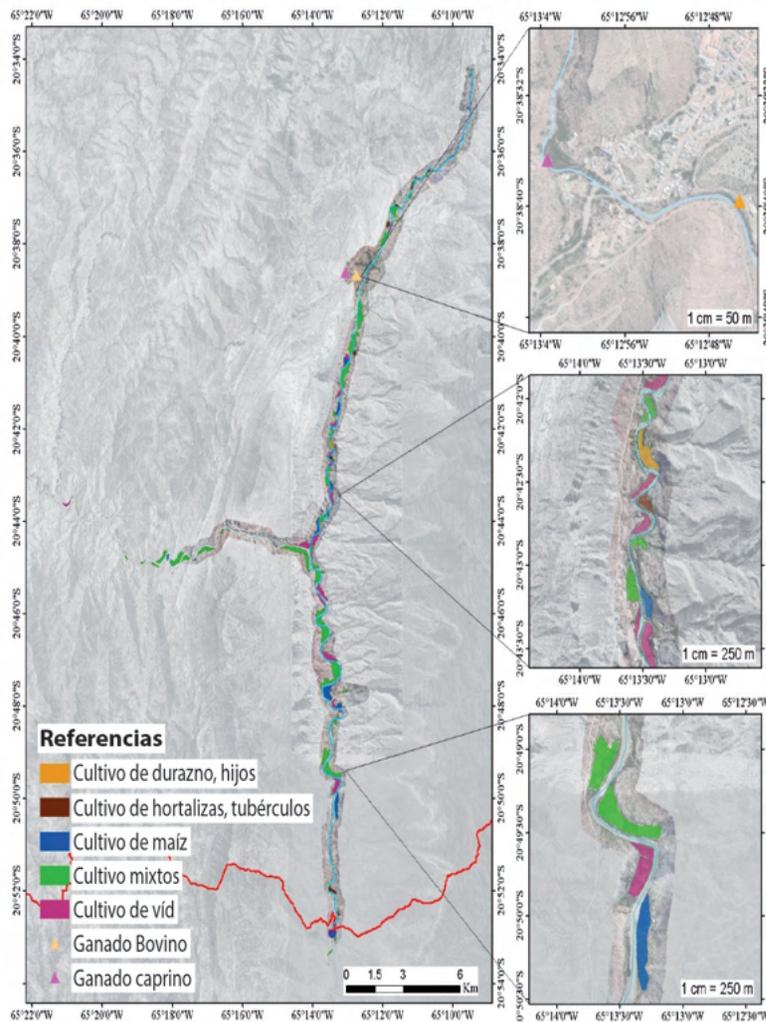
**Tabla 2.** Parámetros estadísticos de la calibración

Estadístico		Valor
Coefficiente de correlación	R2	0.99
Coefficiente de varianza	CV	1.33
Coefficiente de Nash	NS	-1.05



**Figura 6.** Caudal observado - simulado

**Resultados de la evaluación de la exposición**



La evaluación de la exposición en el tramo analizado se realizó mediante un levantamiento de datos complementados con imágenes satelitales y trabajo de campo. Este análisis es esencial para la gestión de riesgos ante inundaciones, ya que determina el grado de contacto de los componentes expuestos con el peligro de inundaciones y su vulnerabilidad.

**Figura 7** Mapa de uso de suelo por componente de exposición

### Clasificación de elementos expuestos

**Infraestructura:** El total expuesto corresponde a 18.41 hectáreas expuestas, la infraestructura está concentrada en el centro urbano de la cuenca, afectado por el río Chico y las quebradas circundantes. Se identificaron seis tipos de edificaciones, destacando: **Mampostería de un piso:** 6.69 ha (36.34%, 174 edificaciones), **Mampostería de dos pisos:** 5.20 ha (28.24%, 101 edificaciones), **Edificio de adobe de un piso:** 3.98 ha (21.62%, 97 edificaciones).

**Cultivos:** Total expuesto corresponde con 375.94 hectáreas, se registraron cinco tipos de cultivos, siendo los cultivos mixtos los más abundantes, con 209.21 ha (55.65%).

**Ganadería:** El total expuesto corresponde con 28 cabezas de ganado, se identificaron dos corrales: 20 cabezas de ganado bovino y 8 de ganado caprino.

Se construyó un mapa de uso de suelo que muestra la ubicación de todos los elementos expuestos a lo largo del río de la cuenca.

Este análisis proporciona una base sólida para la implementación de estrategias de gestión de riesgos ante inundaciones en la región.

### Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad

En la figura 8 se presenta un mapa de vulnerabilidad actual según los eventos históricos registrados hasta la fecha.

Se tiene alrededor de 20 edificaciones con grado de vulnerabilidad muy alto debido al material que presentan y su exposición debido a las cuatro quebradas que circundan el municipio de Camargo.

### Resultados de la evaluación probabilista de riesgo por inundación

La evaluación probabilista de riesgo por inundación en la cuenca fue llevada a cabo utilizando un enfoque cuantitativo que integra los componentes de vulnerabilidad, exposición y amenaza.

Este análisis se fundamentó en la situación actual del área, considerando tanto la infraestructura expuesta como las estructuras de protección existentes, como muros.

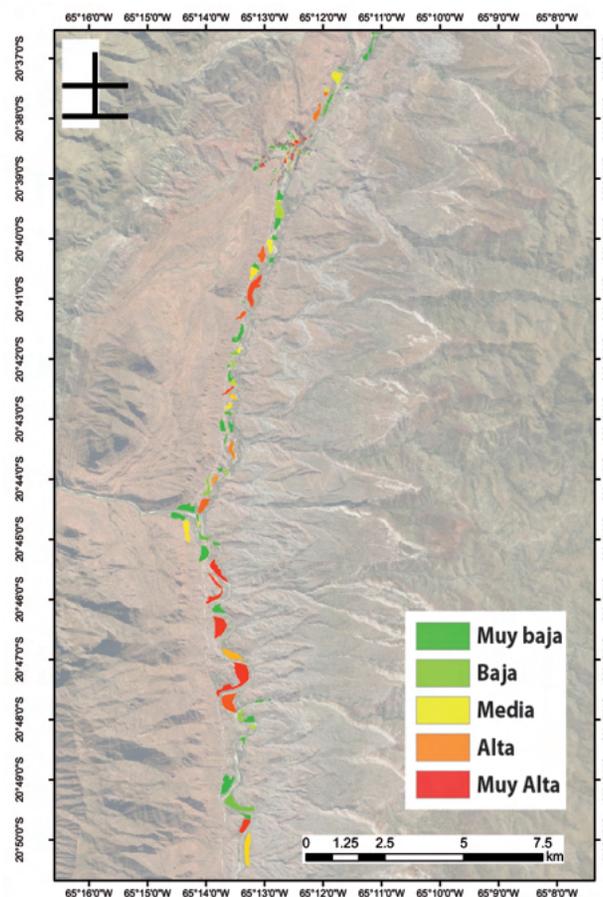


Figura 8. Mapa vulnerabilidad

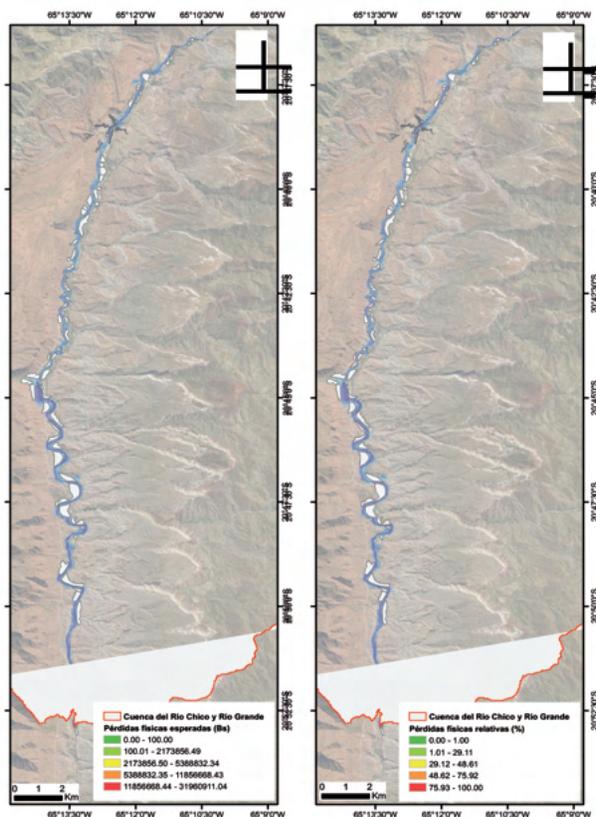
**Resultados de la amenaza por inundación:** La amenaza de inundación se generó mediante la herramienta IT-Inundación, que produjo un archivo que representa distintos escenarios de inundación para diversas tormentas estocásticas y periodos de retorno. Los resultados clave para los diferentes periodos de retorno son:

Tabla 3. Parámetros estadísticos de la calibración

Periodo de Retorno	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)
10 años	1,375.52	6.38	14.9
20 años	1,879.6	7.6	16.4
50 años	2,146.2	8.32	14.9
100 años	2,446.9	8.6	13.8

Estos valores indican que, a medida que aumenta el periodo de retorno, también lo hacen el caudal y el tirante, lo que resalta la creciente amenaza de inundaciones en la región. Se generaron mapas de amenaza que ilustran las áreas de inundación bajo diferentes escenarios de retorno, mostrando variaciones en la velocidad del flujo, especialmente en tramos curvos del río.

**Pérdida Máxima Probable (PML):** La PML se evaluó para cada periodo de retorno y se resumen los resultados a continuación:



**Figura 9.** Mapa pérdidas

**Tabla 4.** Pérdidas en Bs. y % de valor expuesto

Periodo de Retorno (años)	Pérdida (Bs)	% del Valor Expuesto
10	4,789,667.05	0.58
20	6,056,066.67	0.74
50	9,637,827.16	1.17
100	62,705,417.87	7.63

Estos resultados muestran que la pérdida económica aumenta significativamente con el incremento del periodo de retorno, destacando el impacto potencial de eventos de inundación severos.

**Evaluación de escenarios críticos:** Se analizaron tres escenarios de inundación bajo condiciones actuales y de cambio climático, identificando las siguientes pérdidas económicas esperadas:

Escenario 1 (Actual):

Pérdida anual esperada: 1.9 millones de Bs.

Pérdida máxima probable (PML) para 100 años: 62.7 millones de Bs.

Impacto: 572 personas afectadas, 130 edificaciones dañadas, y 90.2 hectáreas de cultivos afectados.

Escenario 2 (Cambio Climático 2021-2060):

Pérdida anual esperada: 5.5 millones de Bs.

Pérdida máxima probable (PML) para 100 años: 164 millones de Bs.

Escenario 3 (Cambio Climático 2061-2100):

Pérdida anual esperada: 19.4 millones de Bs.

Pérdida máxima probable (PML) para 100 años: 144.8 millones de Bs.

Estos escenarios indican un aumento significativo en las pérdidas económicas anuales esperadas bajo condiciones de cambio climático, con un incremento de tres a diez veces el valor en comparación con la situación actual.

### CONCLUSIONES

La cuenca presenta un área de 394,38 hectáreas bajo riesgo por inundación, en donde se identificaron 514 elementos expuestos con una valoración aproximada de bolivianos 822'042.747,44; entre los cuales se encuentran 421 elementos correspondientes a infraestructura con un valor económico de 800'978.152,8 bolivianos, 91 elementos correspondientes a áreas de cultivo valoradas en 20'994.694,6 bolivianos y 2 elementos correspondientes a áreas de ganadería valoradas en 69.900,0 bolivianos.

Respecto a la exposición de vidas humanas se contabilizan 2098 personas aproximadamente.

Los escenarios críticos de inundación analizados generan una pérdida económica máxima para eventos de lluvias con periodo de retorno de 100 años. El análisis de escenarios críticos indica lo siguiente:

La zona crítica desde la perspectiva de riesgo por inundaciones, tiene su repercusión en el sector urbano de la ciudad de Camargo, así como del sector agricultor en vista de que el nivel de exposición y vulnerabilidad ante la inundación resultan elevados; por lo tanto, es en donde se debe concentrar los esfuerzos para la prevención y mitigación del riesgo, así como la preparación para la atención de emergencias en una primera fase de posibles intervenciones para la reducción del riesgo en el municipio.

Los resultados de una evaluación cualitativa o cuantitativa del riesgo son una herramienta muy importante en la toma de decisiones debido a que ambas metodologías combinan diferentes áreas de evaluación y se integran para identificar áreas que pueden convertirse en zonas

de riesgo sino se realiza una planificación adecuada y normada para su uso.

La evaluación de riegos por inundación con enfoque probabilista se constituye en un procedimiento necesario y válido para nuestro país, puesto que permite considerar las incertidumbres asociadas en su evaluación, las relaciones frecuencia-intensidad de los eventos en el análisis, la obtención de diferentes parámetros probabilistas que lo califiquen, la posibilidad de obtener medidas del riesgo únicas en caso de multiamenazas y la consideración de casos particulares de análisis, asociados al cambio climático o a escenarios futuros con algún grado de probabilidad de ocurrencia asignado.

El componente de exposición en la evaluación probabilista comprende la identificación de todas las áreas específicas que se desea evaluar si serán o no afectadas debido a la amenaza, en cambio el modelo determinista delimita el área de mayor exposición considerando la distancia a los ríos y la pendiente del terreno mediante un modelo estadístico, que da como resultado áreas de baja pendiente cercanas a los cursos de agua y de acuerdo a eso se identifica que áreas son las más expuestas.

En la evaluación de la vulnerabilidad probabilista se tiene mejor percepción del daño que puede ocurrir en una infraestructura. La metodología probabilista considera la vulnerabilidad física y humana, en cambio la metodología determinista para la evaluación de la vulnerabilidad puede realizarse considerando los aspectos sociales, económicos, ambientales y otros que se adecúan al contexto.

Respecto a la metodología probabilista de evaluación de riesgo por inundación implementada CAPRA, y sus herramientas IT-lluvia e IT-Inundación, se recomienda en el caso del primero mejorar su desarrollo, incorporando la generación de escenarios estocásticos de precipitación a una escala horaria o menos, y en el caso del segundo permitir la integración con un modelo hidráulico 2D, que es más apropiado (HEC-RAS 2D).

Los daños tangibles cuantificados sólo consideraron daños directos. Los daños directos generalmente consideran daños a estructuras y contenidos, cultivos, etc. Una mejora potencial para la cuantificación de los daños sería incluir los daños al contenido, así como los daños tangibles indirectos (por ejemplo, interrupción del negocio, desvíos y pérdida de ingresos, etc.).

La vulnerabilidad social se determinó únicamente como el número de personas afectadas en función al tirante del agua generado por la amenaza inundación.

Una oportunidad para mejorar el análisis del riesgo social sería considerar los diferentes indicadores de vulnerabilidad social, tales como características

demográficas, estatus socioeconómico, tenencia de la tierra, características del vecindario, tipo de cultivo, etc.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMET, A. E. (2019). Homogeneización de series climáticas con Climatol Versión 3.1.1. Islas Baleares, España.
- Arenas, J. (2014). Impactos del cambio climático en las cuencas andinas. *Environmental Research Journal*, 45(3), 231-245.
- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387-401. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2016). Informe de eventos de inundación en Bolivia.
- Bonilla, C., & Mesa, O. (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Ciencias de la tierra*, 41(158), 107-118.
- Casanueva, A. (2016). Comparación de técnicas estadísticas y dinámicas de regionalización del clima: exploración de métodos para su uso de estudios de impactos. Santander, Spain: Universidad de Cantabria.
- Evaluación de Riesgos Naturales-América Latina (ERN-AL) (2009). Central America Probabilistic Risk Assessment—CAPRA; World Bank and Inter-American Development Bank (IDB): Washington, DC, USA. Disponible en línea: <https://ecapra.org/> (acceso el 20 de agosto de 2024).
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C., Stevens, S. B., Stouffer, R., & Taylor, K. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958.
- Freeman, P., & Warner, K. (2001). Vulnerability of Infrastructure to Climate Variability: How Does this Affect Infrastructure Lending Policies?. World Bank Discussion Paper.
- Freeman, P., & Warner, K. (2001). Vulnerability to climate change and disaster risk. UNISDR.
- GIZ, P. B. (2023). Evaluación de riesgo climático para identificar estrategias robustas de adaptación en el sector del agua en Bolivia. La Paz.
- Holthuijzen, M., Beckage, B., Clemins, P. J., Higdon, D., & Winter, J. M. (2022). Robust bias-correction of precipitation extremes using a novel hybrid empirical quantile-mapping method. *Theoretical and Applied Climatology*, 863-882.

- IPCC. (2021). Resumen para responsables de políticas. En: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ITEC, I. t. (2015). Perfil de riesgo de desastres para Bolivia ante inundaciones y deslizamientos en cuencas seleccionadas. Bogotá, Colombia.
- Keating, A., Campbell, K., Mechler, R., Michel-Kerjan, E., Mochizuki, J., et al. (2014). Operationalizing resilience against natural disaster risk: Opportunities, barriers, and a way forward. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 12, 1-16.
- Kemfert, C. (2005). Global climate protection: immediate action will avert high costs. *DIW Berlin Weekly Report*, 1(8), 135-141.
- MacDonald, A. (1999). Flood risk and climate change: Impacts on global hydrological systems. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Rincón, D.; Velandia, J.F.; Tsanis, I.; Khan, U.T. (2022). Stochastic Flood Risk Assessment under Climate Change Scenarios for Toronto, Canada Using CAPRA. *Water* 14, 227. <https://doi.org/10.3390/w14020227>.
- SEI, S. E. (2023). Balance Hídrico de Bolivia 1980-2020.
- Seiler, C. (2009). Implementation and validation of a Regional Climate Model for Bolivia. (Fan-Bolivia).
- Torres, M.A.; Jaimes, M.A.; Reinoso, E.; Ordaz, M. (2013). Event-Based Approach for Probabilistic Flood Risk Assessment. *Int. J. River Basin Manag*, 12, 377–389.
- Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, M. (2016). Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales. La Paz.



# INGENIUM INGENIUM INGENIUM



# “Evaluación sísmica del concreto de alta resistencia para la optimización preliminar del acero de refuerzo en edificaciones de pórticos regulares según NBDS2023”

Cuéllar, M.<sup>a</sup>, Rojas, M.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Docente e Investigador en el área de estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: cuellar.mirko@usfx.bo

<sup>b</sup> Estudiante de Maestría, Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Centro de Estudios de Posgrado e Investigación, Sucre, Bolivia. E-mail: marianarojasmon@gmail.com

Recibido: 06/10/2024

Aceptado: 12/10/2024

Publicado: 10/11/2024

## RESUMEN

Este estudio preliminar sobre la optimización del acero de refuerzo en estructuras de concreto de alta resistencia (CAR) revela una significativa reducción en el área de acero necesario al incrementar la resistencia del concreto. Las ventajas del CAR incluyen la disminución de la sección de columnas, mejorando la funcionalidad arquitectónica y aumentando la durabilidad debido a su menor porosidad. La comparación técnica entre los modelos con concreto convencional y concreto de alta resistencia establecido por la norma del hormigón boliviano, muestra que la optimización del acero depende en gran medida de la configuración estructural y debe cumplir con los requisitos normativos. En Bolivia, donde el precio del acero ha aumentado un 50% en los últimos seis meses, el uso de CAR, junto con el cemento IP40 cuyo costo se ha mantenido estable, ofrece una solución viable. Los resultados indican una reducción del 30% en la cuantía de acero en columnas, manteniendo prestaciones similares en términos de durabilidad, ductilidad y rigidez, cumpliendo con la normativa sísmica NBDS2023. Este trabajo propone nuevas líneas de investigación para explorar las aplicaciones del concreto en la construcción civil y reducir la dependencia de materiales con precios variables.

**Palabras clave:** alta resistencia, optimización de acero, concreto estructural, diseño sísmico.

## ABSTRACT

This preliminary study on the optimization of reinforcement steel in high-strength concrete (HSC) structures reveals a significant reduction in the required steel area by increasing the concrete's strength. The advantages of HSC include the reduction of column sections, thereby improving architectural functionality and increasing durability due to its lower porosity. The technical comparison between models with conventional concrete and high-strength concrete, as established by the Bolivian concrete standard, shows that steel optimization largely depends on the structural configuration and must comply with regulatory requirements. In Bolivia, where the price of steel has increased by 50% in the last six months, the use of HSC, along with IP40 cement whose cost has remained stable, offers a viable solution. The results indicate a 30% reduction in the steel quantity in columns, maintaining similar performance in terms of durability, ductility, and stiffness, in compliance with the NBDS2023 seismic standard. This work proposes new lines of research to explore the applications of concrete in civil construction and reduce dependence on materials with variable prices.

**Key words:** high strength, steel optimization, structural concrete, seismic design.

## INTRODUCCIÓN

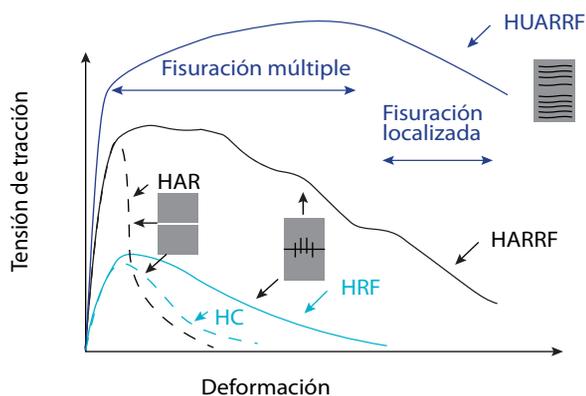
En los últimos meses en Bolivia, el sector de la construcción ha enfrentado un desafío significativo debido al aumento abrupto de los precios de los materiales de construcción, particularmente el acero de refuerzo, cuyo costo ha incrementado en más del 50% (c. Este fenómeno ha generado una búsqueda urgente de alternativas que permitan optimizar el uso de estos materiales sin comprometer la calidad y seguridad de las estructuras. En este contexto, el uso de concretos de alta resistencia (CAR) se presenta como una opción viable y eficiente. A diferencia del acero, el precio del cemento en Bolivia no ha experimentado cambios significativos, lo que posiciona al CAR como una solución económica y técnica para la construcción de diversas obras civiles, en comparación al concreto convencional (CC).

Existen diferentes tipos de cemento, pero en el contexto local se usan cementos IP30 e IP40 para llegar a resistencias desde los 20 a 40 Mpa, por lo que las normativas sísmicas refieren concretos con resistencias mayores a 21Mpa (Grandi, 2024). Estas resistencias son de acuerdo con la dosificación del concreto y los materiales empleados, pero también depende del tipo de cemento usado para su elaboración y pueda llegar a tener mejores prestaciones para el diseño y construcción de las edificaciones en nuestro medio.

Las edificaciones principalmente se construyen de concreto armado, siendo el más usado y empleado para la construcción formal e informal en las diferentes ciudades de Bolivia. Comúnmente estas edificaciones se construyen en base a pórticos y se trabaja con cuantías iguales o menores a las mínimas, donde el acero de refuerzo juega un papel fundamental para buscar una correcta ductilidad en los elementos y estos puedan tener un mejor comportamiento sísmico.

Según (Zerbino, 2016), cuando se elaboran hormigones con muy elevada resistencia a compresión (alta y ultra alta resistencia), la resistencia a tracción también crece, pero en menor medida. Por lo que se debe tomar en cuenta ya que tener excedentes de tracción implica mayor fragilidad en el elemento, por lo que se debe revisar exhaustivamente el diseño de los aceros de refuerzo.

**Figura 1.1:** Gráfica Esfuerzo de tracción y Deformación del concreto sometido a tracción, para diferentes tipos de concretos. Concreto Convencional (HC), Concreto de alta resistencia (HAR), Concreto de ultra alta resistencia con fibras de carbono (HUARRF)



En la figura 1.1 se puede observar que los concretos en masa sin refuerzo o fibras especiales tienen menor deformación, es por eso que las normativas nos indican que el esfuerzo a tracción del concreto es el 10% de su resistencia a compresión. Por lo que para tener una mejor ductilidad es muy importante plantear de manera correcta los aceros de refuerzo, longitudinal y transversalmente en los elementos estructurales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El caso de estudio está especificado en base a parámetros de la Norma Boliviana del Cemento NB-644, quien indica las siguientes características que se incluirán en los modelos numéricos computacionales para las evaluaciones estructurales.

Categorías Resistentes Min. a 3 días		Resistencias a la compresión (MPa) – NB470 (1)		
		Min. a 7 días	Min. a 28 días	
Alta	40	17	25	40
Media	30	---	17	30
Convencional	21	---	13	21

**Tabla 1.1:** Relación de resistencias de concretos según el tipo de cemento (NB-644, 1995).

Para el análisis sísmico estructural se tomará en cuenta dos tipos de concretos anteriormente descritos, el concreto convencional (CC) con una resistencia de 21Mpa y un concreto de alta resistencia de 40Mpa, el módulo de elasticidad estará definido por la siguiente ecuación de la NBDS2023:

$$E_c = 3830 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ (Mpa)} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

## Análisis Sísmico Modal de Respuesta Espectral

Para realizar el análisis modal, es necesario tomar en cuenta la configuración inicial de los modelos, los cambios respectivos serán respecto a su inercia (Sección geométrica), su peso (masa sísmica) y su resistencia (Concreto CC y CAR), las características y parámetros sísmicos para la obtención del espectro de diseño serán tomados de manera igual para realizar la comparación

de las derivas y que estas estén dentro de la NBDS2023. Por lo que se deberá realizar el análisis de derivas de entrepiso con la siguiente ecuación:

$$\gamma = \Delta / H \quad (\text{Ec. 1.2})$$

El valor  $\gamma$  es llamado distorsión de entrepiso o deriva, y es el más empleado en cuantificar la respuesta de edificios, comparar el comportamiento entre diferentes sistemas, y para estimar el grado de daño que puede representarse tanto en la estructura como en los componentes no estructurales. El desplazamiento máximo de la estructura  $\Delta$  medido a nivel del techo se utiliza como medida global de la respuesta del sistema.

### Diseño preliminar de columnas de hormigón armado

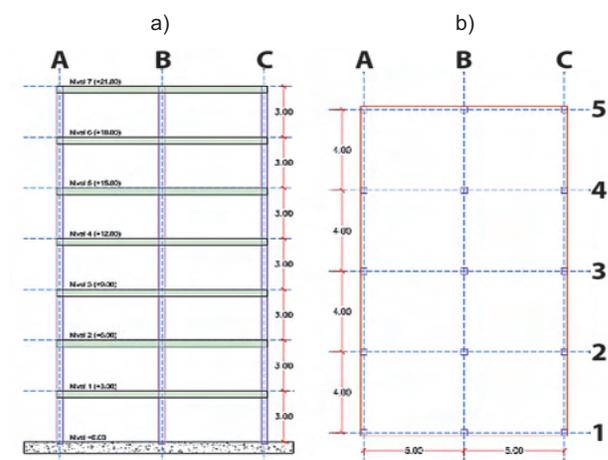
Para el análisis comparativo, se tomará en cuenta principalmente los elementos de soporte para este estudio, el cual comprende en un análisis y verificación de cuantías mínimas para la optimización de aceros de refuerzo en las secciones que lleguen a cumplir lo solicitado para el análisis sísmico y diseño sismorresistente de los elementos según la NBDS2023.

### MODELO DE ESTUDIO:

Se tomó en cuenta un modelo regular con simetría en ambas direcciones, además se debe tomar en cuenta que la estructura será analizada directamente para cumplir las solicitaciones estáticas y dinámicas asignadas, con un sistema estructural de Pórticos Intermedios de Concreto Armado.

### Modelo Tipo para ambos tipos de concreto

En los modelos para el análisis y verificación de la fiabilidad de los resultados se trabajó en base modelos numéricos que aplican el método de los elementos finitos, del cual se introdujeron los materiales, secciones y parámetros de análisis sísmico.



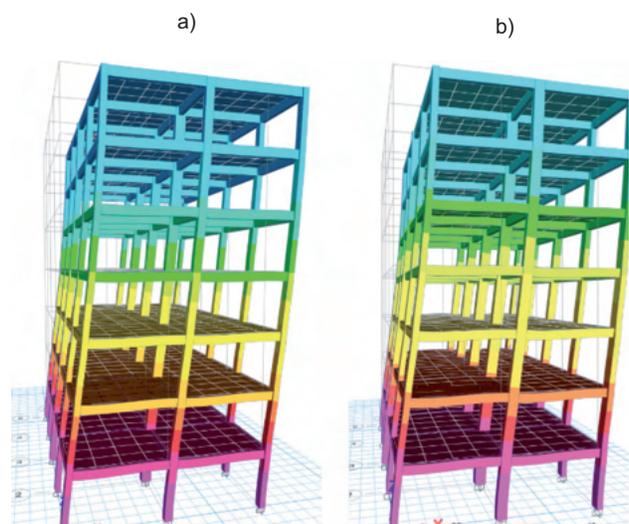
**Figura 1.2:** Configuración estructural inicial. a) Planimetría y ubicación de las columnas. b) Plano frontal para verificación de alturas de entrepiso.

En la figura 1.2, se puede observar los datos iniciales geométricos de la estructura a analizar, el cual tendremos un sistema de entrepiso de losa nervada reticular de 30 cm de espesor, y un sistema resistente a base a pórticos de columnas y vigas.

En la parte sísmica, los modelos tienen aceleración de la amenaza sísmica de 0.20g, según la NBDS2023. De igual manera se manejan parámetros de tipo de suelo, categoría de la edificación y reducción según el sistema estructural de iguales parámetros para ambos modelos estructurales.

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Realizados los análisis sísmicos se realizaron las siguientes comparaciones en los modelos de concreto convencional (MOD-CC) y el de concreto de alta resistencia (MOD-CAR), como se puede observar en la figura 1.3, los periodos de ambas estructuras tienen una mínima diferencia, el MOD-CC, tiene un periodo de vibración de 1.05 segundos, por lo que el MOD-CAR, tiene un periodo de vibración de 0.96 seg.



**Figura 1.3:** Periodos de vibración con las formas de traslación. a) Primer periodo de vibración MOD-CC de 1.05 seg. b) Primer periodo de vibración MOD-CAR de 0.96 seg.

Realizado la revisión de derivas, se obtuvieron los resultados para ambos modelos, los cuales fueron obtenidos variando solo las secciones de columnas, por una parte, para el modelo MOD-CC, se tienen columnas de 30x50 en el perímetro y 40x60 como columnas centrales, entre tanto el modelo MOD-CAR, se optimizaron las secciones de las columnas que son de 30x35 en el perímetro y de 35x50 como columnas centrales. Estos datos se iteraron para obtener derivas cercanas al límite indicado en la norma boliviana de diseño sísmico NBDS2023, que establece un valor límite de 0.011, para sistemas de pórticos intermedios.

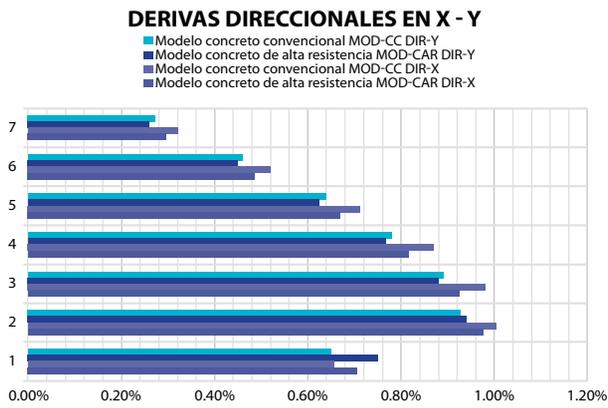
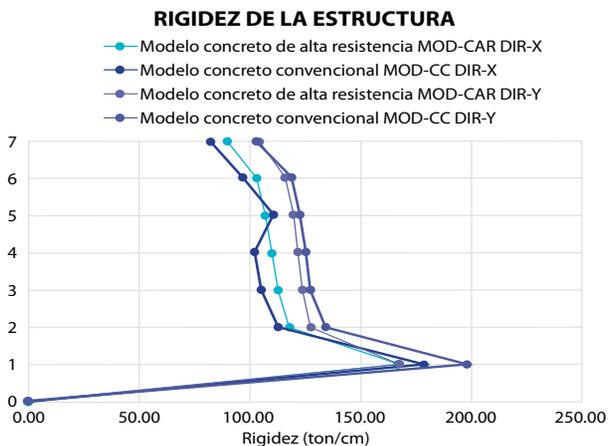


Figura 1.4: Derivas de los modelos MOD-CC y MOD-CAR.

Se puede observar en la figura 1.4, que todas las derivas están por debajo del límite 0.011 (1.1%). Entre tanto todas cumplen lo indicado en la norma NBDS2023.



La masa total de la estructura, el modelo MOD-CAR, tiene un peso total de 11191.08 KN, y el modelo MOD-CC su valor es de 11527.50 KN, por lo tanto, se tiene una diferencia del 3% de peso entre ambos modelos, lo que indica que existe una reducción del peso estructural solo por la disminución de columnas, sin perder rigidez global.

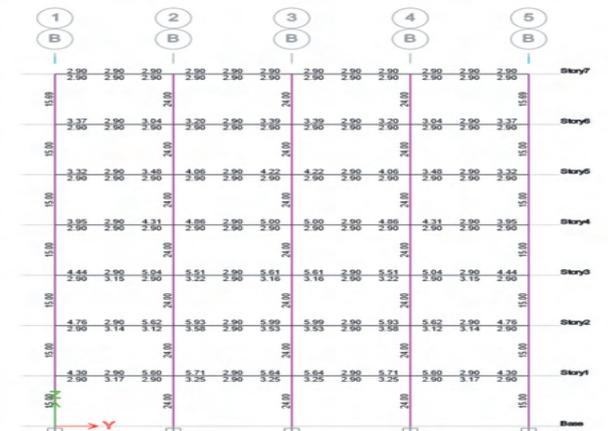


Figura 1.5: Rigidez Global de la estructura de los modelos MOD-CC y MOD-CAR.

Se tienen valores similares en cuanto a la rigidez global valores máximos que se tiene de ambas estructuras de las dos direcciones aplicando el sismo según la NBDS2023, como se muestra los valores máximos en la figura 1.5.

Para el diseño estructural de columnas y obtener cuantías por  $cm^2$ , se tomó en cuenta las combinaciones máximas indicadas en la norma ACI318-14 incluyendo cargas muertas (D), carga viva (L) y carga de sismo (S).

Para el modelo MOD-CC, se tienen cuantías mínimas del 1% en las secciones de columnas que serán nuestra referencia para obtener el porcentaje de optimización del acero entre ambos modelos, en la figura 1.6, se muestra cuantías de las columnas perimetrales de  $15cm^2$  y  $24cm^2$  para las columnas centrales.

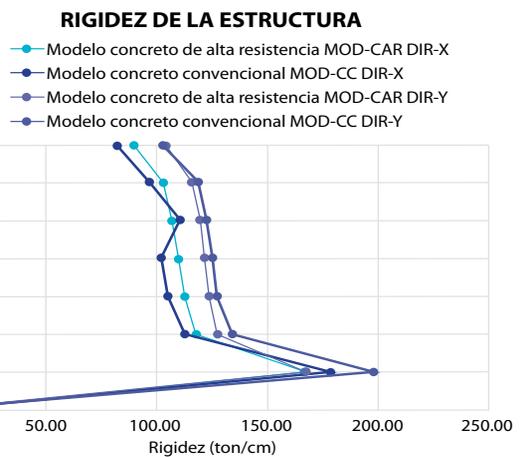


Figura 1.6: Cuantías en las columnas y vigas del Modelo MOD-CC (Concreto Convencional H21 Mpa.)

Entre tanto para el modelo MOD-CAR, las cuantías tienen una disminución debido a que las secciones de las columnas son de menor sección, se puede observar en la figura 1.6, que las cuantías están con  $10.50 cm^2$  para columnas perimetrales y  $17.50 cm^2$  para las columnas centrales, por la tanto existe una disminución, esto se puede observar en la figura 1.7.



Figura 1.7: Cuantías en las columnas y vigas del Modelo MOD-CAR (Concreto Alta Resistencia H40 Mpa.)

Al hacer estas comparaciones entre ambos modelos se puede observar que tener estructuras con concretos de alta resistencia, la sección disminuye entre 10 a 15cm en un lado. Por lo tanto la cuantía de acero de los elementos disminuye en un 30 % aproximadamente, así como se puede observar en la tabla 1.2.

Cuantías (cm2)				
	Mod-CC	Mod-CAR	Diferencia	Porcentaje
<b>C-Perimetral</b>	15.00	10.50	4.50	30%
<b>C-Central</b>	24.00	17.50	6.50	27%

**Tabla 1.2:** Relación de cuantías para los modelos MOD-CC y MOD-CAR.

### CONCLUSIONES

Es necesario indicar que este análisis preliminar de optimización de aceros por cuantía debe complementarse con un trabajo de detallamiento sísmico y complementación de que elementos más se puede optimizar en cuanto a sección y áreas de acero. Pero este trabajo de investigación nos muestra que existe una tendencia de disminuye considerablemente el área de acero que requiere un elemento de soporte al aumentar la resistencia del concreto.

Las ventajas de usar concretos de alta resistencias (CAR) son muchos, entre ellos, disminuye la sección de las columnas por lo tanto la funcionalidad arquitectónica tiende a mejorar por si tiene más espacio libre en los ambientes, la durabilidad también es mayor debido a que estos concretos tienen menor porosidad, lo que hace que evite el ingreso de agentes corrosivos.

Realizando la comparación técnica de los Modelos MOD-CC y MOD-CAR, se concluye que el éxito de la optimización de cuantías de acero por área de sección de columnas bruta, dependerá mucho de la configuración estructural, que deberá iterarse hasta llegar a cumplir con los requisitos establecidos por la normativa y trabajar con cuantías mínimas de acero de refuerzo, esto debido a que en Bolivia, el acero de construcción que en la mayoría es importado de otros países, tuvo un ascenso de precios de un 50%, esto hace se busque soluciones como la propuesta en este trabajo de investigación donde se puede aprovechar el cemento IP40 que su costo se mantiene a pesar de la subida de otros materiales de construcción.

Por lo tanto la cuantía de acero bajo un 30% en las columnas, respecto al modelo MOD-CC, teniendo similares derivas y rigideces globales, y además buscando siempre el cumplimiento de la normativa sísmica NBDS2023, llegando a disminuir las columnas de 40x60 del MOD-CC, a secciones de 35x50 del MOD-CAR, esto establece una tendencia a tener iguales prestaciones en términos de durabilidad, ductilidad y rigidez, solo aumentado la resistencia del concreto.

El presente trabajo tiene como objetivo establecer líneas de investigación basadas en los problemas actuales de la sociedad boliviana. Dado que el concreto es un material relativamente económico, se propone realizar más estudios sobre sus diversas aplicaciones en obras civiles. Además, se busca explorar cómo el uso del concreto puede reducir la dependencia de otros materiales que frecuentemente experimentan fluctuaciones en sus precios.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute. (2014). ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Estrada Córdoba, R. E., & Párraga Otálora, R. A. (2023). Evaluación sísmica de edificaciones existentes de concreto reforzado con base en el ASCE 41-17 Universidad de Antioquía, Medellín, Colombia.
- Hu, R.; Fang, Z.; Shi, C.; Benmokrane, B. and Su, J. (2020). "A review on seismic behavior of ultra-high performance concrete members", *Advances in Structural Engineering*, pp. 1-16.
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2017). NB 011: Cementos. Definiciones, clasificación y especificaciones. La Paz, Bolivia: IBNORCA.
- Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda. (2023). Norma Boliviana de Diseño Sísmico (NBDS2023). La Paz, Bolivia: Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda.
- Young S. Cho (2003), "Non-destructive testing of high strength concrete using spectral analysis of surface waves", *Journal NDT&E International*, Vol. 36, pp. 229-235.
- Zerbino, R.; Giaccio, G.; Celeste and Torrijos M.A. (2016), "Hormigones de ultra alta resistencia reforzados con fibras", VII Congreso Interacional – 21ª Reunión técnica de la AATH.
- Zohrevand P and Mirmiran A (2013a) "Effect of column parameters on cyclic behavior of ultra-high-performance concrete-filled fiber-reinforced polymer tubes". *ACI Structural Journal* 110(5): 823–832.

# INGENIUM



## SOCIEDAD CIENTÍFICA DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA CIVIL: PROMOVIENDO LA EXCELENCIA ACADÉMICA Y PROFESIONAL

### ¿Quiénes Somos?

La Sociedad Científica de Estudiantes de Ingeniería Civil (SCEIC) es una organización conformada por estudiantes apasionados por la innovación, el aprendizaje continuo y la creación de conocimiento dentro de la ingeniería civil. Nuestra misión se centra en proporcionar un entorno que fomente el desarrollo académico y profesional de nuestros miembros, promoviendo la excelencia en cada una de nuestras actividades.

Desde su creación, la SCEIC ha sido un espacio de encuentro para estudiantes interesados en expandir sus horizontes y adquirir habilidades más allá de las aulas. A través de nuestras iniciativas, buscamos no solo mejorar el perfil académico de nuestros miembros, sino también inspirar a las futuras generaciones de ingenieros a contribuir activamente en el desarrollo de la sociedad.

La participación en una sociedad científica como la nuestra permite a los estudiantes estar en contacto con los últimos avances en el campo de la ingeniería civil, involucrarse en actividades de investigación y divulgación, y desarrollar habilidades de liderazgo y trabajo en equipo que serán fundamentales para su vida profesional. Como miembros de esta comunidad, nos enorgullece construir un legado de excelencia y compromiso con el desarrollo científico y tecnológico.



## LO QUE HACEMOS: UN COMPROMISO CON LA INVESTIGACIÓN Y EL DESARROLLO

En la Sociedad Científica de Estudiantes de Ingeniería Civil, nuestras actividades se orientan hacia la creación de conocimiento y la promoción de la innovación en el ámbito de la ingeniería. A través de diversas iniciativas, nos esforzamos por proporcionar a nuestros miembros oportunidades para el desarrollo académico y profesional.

### INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y PUBLICACIONES

Una de las principales áreas de enfoque de nuestra sociedad es la investigación científica. Trabajamos en proyectos en diversas ramas de la ingeniería civil, desde la gestión de recursos hídricos y el diseño estructural hasta la sostenibilidad y la ingeniería ambiental. Los resultados de nuestras investigaciones se publican en revistas especializadas y se presentan en congresos y seminarios, contribuyendo así al avance del conocimiento en nuestro campo.



### ACTIVIDADES Y COMPETENCIAS: RETOS QUE IMPULSAN EL CRECIMIENTO

Más allá de la investigación, nos esforzamos por crear un entorno dinámico y desafiante a través de actividades académicas y recreativas. Estas competencias no solo permiten a nuestros miembros aplicar sus conocimientos en situaciones prácticas, sino que también promueven un espíritu de competencia sana y camaradería entre los participantes.

#### Torneos de Conocimiento

En los torneos de conocimiento, los estudiantes tienen la oportunidad de poner a prueba su intelecto y enfrentarse a sus compañeros en una competencia de habilidades técnicas y teóricas.

#### Torneos de Puentes de Palitos y Fideos

La creatividad y la destreza estructural se ponen a prueba en los torneos de construcción de puentes

con palitos y fideos. Los participantes deben diseñar y construir puentes que sean capaces de soportar cargas específicas, demostrando así sus habilidades de diseño y resolución de problemas.



#### Concursos de Cubo Rubik

Más allá de los aspectos puramente técnicos, la SCEIC organiza concursos de cubo Rubik, en los que los estudiantes demuestran su rapidez y destreza mental.

#### Torneos Matemáticos

En los torneos matemáticos, los estudiantes compiten por resolver problemas complejos en el menor tiempo posible.



#### Torneos de Esferas de Hormigón

En una competencia única de construcción, los participantes diseñan y fabrican esferas de hormigón, aplicando sus conocimientos sobre materiales y diseño estructural.



### Organización de Congresos: El Civilcon

Este año, la Sociedad Científica de Estudiantes de Ingeniería Civil tiene el honor de ser la anfitriona del “Civilcon”, el congreso nacional de estudiantes de ingeniería civil. El evento reúne a jóvenes de todo el país y cuenta con la participación de invitados internacionales. Durante el congreso, se llevan a cabo talleres especializados, conferencias con profesionales destacados y actividades que promueven el intercambio de ideas y la colaboración.

Club de Lectura y Talleres: Espacios de Crecimiento Personal y Profesional

Dentro de nuestra sociedad, también promovemos actividades que trascienden lo académico, como nuestro club de lectura. Aquí, los estudiantes tienen la oportunidad de explorar textos clásicos y contemporáneos, y de discutir ideas que contribuyen a su formación integral.

### NUESTRA MISIÓN: FOMENTAR EL DESARROLLO ACADÉMICO Y PROFESIONAL

Nuestra misión como sociedad científica es fomentar el desarrollo académico y profesional de los estudiantes de ingeniería civil a través de la investigación científica, la colaboración y la participación activa en actividades académicas y recreativas.

### NUESTRA VISIÓN: SER UNA SOCIEDAD LÍDER EN LA PROMOCIÓN DE LA INGENIERÍA CIVIL

Nos proyectamos como una sociedad científica líder, reconocida por nuestras contribuciones científicas, la organización de eventos de alto nivel y el desarrollo integral de nuestros miembros.

### CONCLUSIÓN

La Sociedad Científica de Estudiantes de Ingeniería Civil es mucho más que una organización académica. Es un espacio donde el conocimiento, la creatividad y el trabajo en equipo se unen para formar a los futuros líderes de la ingeniería civil.

## TARIFARIO INSTITUTO DE AGUAS FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

N <sup>a</sup>	DETALLE O CONCEPTO DE VENTA	CANTIDAD	UNIDAD	INSTITUCIONAL			PRIVADO
				TIPO A	TIPO B	TIPO C	
<b>INSTITUTO DE AGUAS</b>							
<b>HIDROMETRÍA (AFOROS EN RÍOS, CANALES Y TUBERÍAS)</b>							
1	Aforo en ríos y canales	1	Punto	150	375	750	1500
<b>ENSAYOS GEOFÍSICOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (SEVs y TOMOGRAFÍAS 2D)</b>							
2	Sondeo eléctrico vertical	1	SEV	250	625	1250	2500
3	Tomografía	1	Estudio	700	1750	3500	7000
<b>ASESORAMIENTO ESPECIALIZADO</b>							
4	Asesoramiento en estudios hidrológicos	1	Estudio	250	625	1250	2500
5	Asesoramiento en estudios hidrogeológicos	1	Estudio	700	1750	3500	7000
6	Asesoramiento en estudios hidráulicos	1	Estudio	700	1750	3500	7000

 <b>TARIFARIO LABORATORIOS FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL</b>					
N°	DETALLE O CONCEPTO DE VENTA	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO (Bs)	OBSERVACIONES
<b>LABORATORIO DE ASFALTOS</b>					
<b>ENSAYO EN EMULSIONES ASFÁLTICAS</b>					
1	Densidad o peso específico a 25° C	1	Muestra	150	
2	Viscosidad Saybolt Furol a 25°C, (s)	1	Muestra	300	
3	Estabilidad al Almacenamiento, 24 hrs (%)	1	Muestra	150	
4	Destilación (Residuo, Disolventes %)	1	Muestra	500	
5	Ensayo de tamizado, (No 20) (%)	1	Muestra	250	
6	Contenido de agua %	1	Muestra	100	
7	Carga de Partículas de Emulsionado Catiónico	1	Muestra	80	
8	Destilación de Emulsiones asfálticas	1	Muestra	300	
9	Penetración a 25°C, 100g, 5s (Residuo de destilación)	1	Muestra	200	
10	Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (Residuo de destilación)	1	Muestra	280	
11	Ensayo de la mancha (Residuo de destilación)	1	Muestra	100	
12	Solubilidad en Tricloroetileno (%) (Residuo de destilación)	1	Muestra		
<b>ENSAYO EN DILUIDOS MC-30 ASFÁLTICAS</b>					
13	Viscosidad Saybolt Furol a 25°C, (s)	1	Muestra	300	
14	Punto de inflamación Tag. Copa Abierta de Cleveland, °C.	1	Muestra	250	
15	Total destilación hasta 360°C	1	Muestra	500	
16	Penetración a 25°C, 100g, 5s (Residuo de destilación)	1	Muestra	200	
17	Destilación de asfaltos cortados	1	Muestra	300	
18	Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (Residuo de destilación)	1	Muestra	280	
19	Solubilidad en Tricloroetileno (%) (Residuo de destilación)	1	Muestra		
20	Ensayo de la mancha (Residuo de destilación)	1	Muestra	100	
21	Contenido de agua %	1	Muestra	100	
<b>ENSAYOS EN CEMENTO ASFALTO CONVENCIONAL Y MODIFICADO</b>					
22	Penetración muestra original 25°C	1	Muestra	200	
23	Punto de inflamación Tag. Copa Abierta de Cleveland, °C.	1	Muestra	250	
24	Ductilidad a 25°C, 5 cm/min	1	Muestra	280	
25	Recuperación Elástica (%) 25°C , 20 cm.	1	Muestra	420	
26	Viscosidad Rotacional a 145°C (cP)	1	Muestra	550	
27	Viscosidad Saybolt furol	1	Muestra	300	
28	Ensayo de la película delgada ASTM D 2872	1	Muestra		
29	Punto de ablandamiento °C	1	Muestra	210	
30	Punto de ablandamiento °C (después de estabilidad a almacenamiento por 120 hrs)	1	Muestra	250	
31	Punto de Inflamación.	1	Muestra	100	
32	Penetración muestra 25 °C (después de estabilidad a almacenamiento por 120 hrs)	1	Muestra	250	
33	Peso específico de cementos asfálticos - picnómetro	1	Muestra	150	
34	Densidad de la mezcla asfáltica - RICE	1	Muestra	220	
35	Determinación de la densidad o peso específico de Concreto asfáltico a 25°C	1	Muestra	150	
36	Determinación del índice de rugosidad	1	Muestra	200	
37	Punto de inflación y combustión mediante vaso abierto de cleveland	1	Muestra	250	
38	Densímetro eléctrico de asfaltos	1	Muestra	50	
39	Diseño Marshall completo	1	Diseño	7000	
40	Extracción de núcleos de 2 y 4 pulg.	1	Muestra	250	
41	Determinación de contenido asfáltico en mezclas nuevas y en evaluaciones	1	Muestra	200	

42	Medida de la deflexión de un pavimento empleando dispositivo de carga estática no continua - viga benkelman	1	Muestra	400	10 Puntos mínimos de control.
43	Medida de la deflexión de un pavimento empleando Deflectómetro de peso liviano LWD.	1	Muestra	200	
<b>LABORATORIO DE HORMIGÓN</b>					
44	Análisis granulométrico por tamizado	1	Muestra	220	
45	Determinación de peso unitario de agregados	1	Muestra	200	
46	Densidad, densidad relativa y absorción de agregado grueso	1	Muestra	200	
47	Densidad, densidad relativa y absorción de agregado fino	1	Muestra	200	
48	Método para la resistencia a la degradación de los áridos gruesos de tamaño pequeño por el método de abrasión e impacto en la máquina de los ángeles (500 rev)	1	Muestra	350	
49	Método para la resistencia a la degradación de los áridos gruesos de tamaño pequeño por el método de abrasión e impacto en la máquina de los ángeles (1000 rev)	1	Muestra	550	
50	Determinación de aplanamiento y alargamiento en agregados gruesos	1	Muestra	450	
51	Determinación de asentamiento de concreto hidráulico - cono de abrams	1	Muestra	120	
52	Ensayo de compresión de probetas cilíndricas	1	Muestra	20	
53	Ensayo de rotura a la flexo - tracción en probetas prismáticas.	1	Muestra	80	
54	Ensayo de determinación del número de rebote del hormigón endurecido "esclerómetro"	1	Muestra	180	
55	Determinación del peso específico del cemento	1	Muestra	300	
56	Extracción de núcleos de 2 y 4 pulg.	1	Muestra	250	
57	Diseño de hormigón hidráulico - ACI (Incluye: granulometría gruesa y fina de agregados, peso específico, peso unitario, desgaste de los ángeles)	1	Diseño	1500	
<b>LABORATORIO DE SUELOS</b>					
58	Investigación de suelo mediante barreno	1	Muestra	200	
59	Análisis granulométrico por tamizado	1	Muestra	220	
60	Ensayo de penetración estandar SPT (incluye - clasificación de suelos)	1	Muestra	1300	valor entre 1 a 2 mteros - mayores alturas se incrementa 500 Bs/ml
61	Determinación de límite líquido de una muestra de suelo	1	Muestra	180	
62	Determinación de límite plástico de una muestra de suelo	1	Muestra	180	
63	Determinación de gravedad específica de los suelos	1	Muestra	180	
64	Determinación de contenido de humedad	1	Muestra	100	
65	Equivalente de arena	1	Muestra	350	
66	Ensayo de compactación proctor estandar y/o modificado	1	Muestra	350	
67	Determinación de la relación de soporte california CBR	1	Muestra	700	
68	Determinación de densidad in situ - cono de arena	1	Muestra	150	
69	Ensayo de consolidación unidimensional de los suelos	1	Muestra	1000	
70	Determinación de la resistencia al corte método de corte directo	1	Muestra	1200	
71	Determinación de aplanamiento y alargamiento en agregados gruesos	1	Muestra	450	
72	Análisis del tamaño de las partículas de suelo por hidrometría	1	Muestra	300	
<b>GABINETE DE TOPOGRAFÍA</b>					
73	Levantamiento topográfico con dron por kilometro	1		1200	
74	Levantamiento topográfico estación total por kilometro	1		1200	
75	Levantamiento topográfico estación total por metro cuadrado	1	m2	7	
76	Determinación de puntos de referencia BM	1	punto	1200	
<b>INSTITUTO DE AGUAS</b>					
<b>HIDROMETRÍA (AFOROS EN RIOS, CANALES Y TUBERIAS)</b>					
77	Aforo en rios y canales	1	Punto	1500	
<b>ENSAYOS GEOFÍSICOS DE RESISTIVIDAD ELECTRICA (SEVs y TOMOGRAFÍAS 2D)</b>					
78	Sondeo eléctrico vertical	1	SEV	2500	

79	Tomografía	1	Estudio	7000	
<b>ASESORAMIENTO ESPECIALIZADO</b>					
80	Asesoramiento en estudios hidrológicos	1	Estudio	2500	
81	Asesoramiento en estudios hidrogeológicos	1	Estudio	7000	
82	Asesoramiento en estudios hidráulicos	1	Estudio	7000	
<b>LABORATORIO DE QUIMICA SANITARIA</b>					
<b>ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS</b>					
83	Sólidos Disueltos Totales (SDT)	1	mg/L	50	
84	pH	1	-	15	
85	Dureza total	1	mg/L CaCO3	35	
86	Temperatura	1	C	10	
87	Conductividad eléctrica específica (CE)	1	mS/cm	12	
88	Oxígeno Disuelto (OD)	1	mg/L	30	
89	Salinidad	1	PPT	15	
90	Calcio (Ca )	1	mg/L como Ca	50	
91	Magnesio (Mg )	1	mg/L	50	
92	Potasio k+	1	mg/L	50	
93	Sulfatos (SO)	1	mg/L	50	
94	Bicarbonatos (HCO3)	1	mg/L	40	
95	Cloruros (Cl)	1	mg/L	50	
96	Turbidez	1	UNT	20	
97	Sodio (Na)	1	mg/L	50	
98	RAS	1	-	50	
99	RIVERSIDE	1	-	50	
<b>ANÁLISIS DE PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS</b>					
100	Coliformes totales	1	NMP/100mL	200	
101	DBO	1	mg O2/L	200	
102	DQO	1	mg O2/L	200	
<b>DETALLE DEL TARIFARIO INSTITUCIONAL</b>					
<p>- LA TARIFA ES ÚNICA TANTO PARA SERVICIO EXTERNO COMO PARA TESIS DE MAESTRIAS.</p> <p>- SE PODRÁ CONSIDERAR <b>DESCUENTOS</b> EN SERVICIOS CONTÍNUOS O PROGRAMAS, PREVIO CONVENIO INTERINSTITUCIONAL.</p>					