

**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**

---

# FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



# CONTENIDO

PRESENTACIÓN .....	4
PRESENTACIÓN .....	5
PROPAGACIÓN DEL INCREMENTO DE ESFUERZOS VERTICALES EN UN SUELO AGRÍCOLA DE TARABUCO: MÓDULO DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTE DE POISSON EN SUELOS NO SATURADOS .....	7
DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE LAS CONEXIONES METÁLICAS DEL PUENTE FÉRREO DE ÑUCCHU: RESISTENCIA Y CONSERVACIÓN PATRIMONIAL .....	15
ANÁLISIS MATRICIAL DE ESTRUCTURAS 2D MEDIANTE EL MÉTODO DE RIGIDEZ EN PYTHON .....	27
ALCORQUES INUNDABLES COMO SOLUCIÓN DE DRENAJE SOSTENIBLE EN ZONAS URBANAS: CASO DE ESTUDIO EN EL CAMPUS UNIVERSITARIO U.S.F.X. ....	37
EFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN UN CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO TIPO PG 76-28 PMB 45/80-65, EN SUS PRINCIPALES PROPIEDADES .....	45
ANÁLISIS COMPARATIVO DE PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS POLIMÉRICAS PARA INSTALACIONES HIDROSANITARIAS MEDIANTE MODELOS EMPÍRICOS .....	51
EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE UN REFUERZO HÍBRIDO ACERO-BAMBÚ PARA OPTIMIZAR CUANTÍAS EN ELEMENTOS A FLEXIÓN .....	65
EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE ALTERNATIVAS SOSTENIBLES EN EL TRAZADO DE LA CARRETERA SUCRE-SANTA CRUZ MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) .....	75
ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN MEDIANTE MEDICIONES HIDROLÓGICAS EN UNA CUENCA DE ALTA MONTAÑA .....	87
10 AÑOS CONSTRUYENDO CIENCIA Y LIDERAZGO: LA SOCIEDAD CIENTÍFICA DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA CIVIL Y SU IMPACTO EN LA INGENIERÍA .....	95



## PRESENTACIÓN

---

En mi condición de Decano de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, con profunda satisfacción presento el 6° número de la “REVISTA INGENIUM”, la cual como en las anteriores versiones contiene artículos científicos que fueron elaborados por varios docentes de la Facultad, así como por Ingenieros Civiles de nuestro medio comprometidas y decididas que siempre están incursionando en el campo de la investigación.

Los trabajos presentados tienen un alto contenido científico, los mismos son inéditos y se refieren a problemas actuales que se presentan en el amplio campo de la Ingeniería Civil.

El lector encontrará en el material bibliográfico artículos eficiente y didácticamente planteados, los cuales cubrirán plenamente su expectativa

Estoy muy feliz y agradecido con Dios, porque la “REVISTA INGENIUM” se institucionalizó, porque cada año a partir del 2020 se presenta la misma el 10 de noviembre, ocasión en la que celebramos la creación de la Carrera de Ingeniería Civil y la Facultadización.

La presente gestión, las actuales autoridades estuvimos abocados en el proceso de Acreditación de la Carrera de Ingeniería Civil ante el Sistema Educativo del MERCOSUR en el proceso se pudo evidenciar que es muy importante la dimensión de investigación científica, la cual la Facultad cumple con la publicación anual de la “REVISTA INGENIUM”.

Los artículos que se encuentran en la Revista quedarán de manera perenne para las futuras generaciones que pasaran por nuestras aulas a formarse profesionalmente como “Ingenieros Civiles”, porque siempre podrán acudir a la Biblioteca de la Facultad a interiorizarse del contenido de las mismas y de esa manera enriquecer y cualificar sus conocimientos.

Felicito a los organizadores, a los miembros de la Comisión de Revisión y a todos los investigadores que participaron en la Convocatoria para hacer una feliz realidad esta nueva versión de la “REVISTA INGENIUM”.

MS.c. Ing. Juan José Rosales Valda  
**DECANO DE LA 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 sexto 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 tercer 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 INGENIERIA CIVIL**  
**U.S.F.X.CH.**



# PROPAGACIÓN DEL INCREMENTO DE ESFUERZOS VERTICALES EN UN SUELO AGRÍCOLA DE TARABUCO: MÓDULO DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTE DE POISSON EN SUELOS NO SATURADOS

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

<sup>a</sup> 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.TorricoBravo@UGent.be](mailto:JuanAlfredo.TorricoBravo@UGent.be)

<sup>b</sup> Doctorando de Universidad de Gante, Departamento de ingeniería civil. E-mail: [christianbarahona07@outlook.com](mailto:christianbarahona07@outlook.com).

<sup>c</sup> Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de ingeniería civil. E-mail: [Gemmina.DiEmidio@ugent.be](mailto:Gemmina.DiEmidio@ugent.be).

<sup>d</sup> Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de Biociencias, Universidad de Gante. E-mail: [Wim.Cornelis@ugent.be](mailto:Wim.Cornelis@ugent.be).

<sup>e</sup> 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](mailto:geotecnia@gmail.com).

<sup>f</sup> Director del laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Gante, Universidad de Gante. E-mail: [Adam.Bezuijen@ugent.be](mailto:Adam.Bezuijen@ugent.be).

Recibido: 03/10/2025

Aceptado: 10/10/2025

Publicado: 10/11/2025

## RESUMEN

El presente artículo determina y evalúa los parámetros elásticos del suelo "Módulo de elasticidad" y "Coeficiente de Poisson" en un perfil parcialmente saturado bajo una succión de 46 kPa. Para el cálculo de estos parámetros se ha realizado un ensayo de laboratorio con un equipo triaxial de suelos no saturados. La muestra empleada ha sido del tipo reconstituida obtenida del sitio de experimentación que es un terreno agrícola ubicado en la localidad de Tarabuco, representada en su perfil estratigráfico por un suelo limo arenoso (ML). Para realizar la medición de la succión matricial se han empleado tensiómetros de campo (modelo Red Fill) a una profundidad de 0.30 m. Los resultados que se han obtenido han sido de 53,72 MPa para el módulo de elasticidad y 0,37 para el coeficiente de Poisson; estos resultados han sido sometidos a comparación respecto a valores referenciales obtenidos en condiciones saturadas (succión nula) y parcialmente saturadas. El análisis comparativo de los resultados ha concluido y comprobado que los parámetros elásticos obtenidos en condiciones parcialmente saturadas son superiores a los valores referenciales en condiciones saturadas, esto debido a la presencia de la succión matricial.

**Palabras clave:** Módulo de Elasticidad, Coeficiente de Poisson, succión matricial, tensiómetro Red Fill.

## ABSTRACT

The present paper assesses the elastic parameters "Elastic Modulus" and "Poisson's ratio" along an unsaturated soil profile with a matric suction of 46 kPa at 0.30m depth. To determine these parameters, a laboratory test was performed through an unsaturated soil triaxial equipment. The sample used was a reconstituted type obtained from the experimental site, that corresponds to an agricultural place located in Tarabuco-Chuquisaca, which are represented in its stratigraphic profile as a sandy silt soil (ML). In order to measure matric suction, field tensiometers (Red Fill model) were used at a depth of 0.30 m. The results obtained were 53.72 MPa for the Elastic Modulus and 0.37 for the Poisson's ratio; these results were compared with respect to values obtained under saturated conditions (zero suction) and unsaturated conditions. The comparative analysis of the results was concluded and verified that the elastic parameters obtained under unsaturated conditions are higher than the reference values under saturated conditions, this due to the presence of matric suction.

**Keywords:** Hydrometric stations, Arduino, Water resource monitoring.

## INTRODUCCIÓN

En términos generales, el módulo de elasticidad es una medida de la rigidez de un material en su estado elástico, mientras que el coeficiente de Poisson es la relación entre las deformaciones transversal y longitudinal de un determinado material, cuando es sometido bajo carga axial.

En los suelos, se debe tener en cuenta que las propiedades mecánicas e hidráulicas de estos no dependen únicamente del tipo de suelo (mineralogía y granulometría), sino que también de la estructura generada durante el proceso de compactación. Cambios en las condiciones de compactación (humedad, densidad seca y energía de compactación) de un mismo suelo conducen a estructuras con diferentes grados de saturación en consecuencia, con distintas respuestas frente a las acciones mecánicas e hidráulicas. La Mecánica del Suelo tradicional se ha ocupado principalmente de los suelos saturados. Ello se debe a que, en general, la rigidez y la resistencia de los suelos parcialmente saturados son mayores, por lo que es más conservador suponer que, en cualquier caso, los suelos pueden estar saturados. La mayor resistencia de los suelos en estado parcialmente saturado se debe a la presencia de la succión matricial a través de los denominados meniscos, las interfaces aire-agua-sólido. Por otra parte, el estudio de los suelos saturados es mucho más sencillo. (Tardón, 2014).

La determinación de los parámetros elásticos de un suelo, como son el Módulo Elástico y el coeficiente de Poisson, resulta esencial para conocer el comportamiento de éstos y saben cómo van a fallar. En términos generales, la mayoría de los estudios que han estudiado el coeficiente de Poisson, lo han determinado de un modo indirecto. Estos estudios han obtenido el valor del módulo de elasticidad (E) y del módulo de corte (G) mediante ensayos experimentales, y mediante la relación existente entre ambos módulos han obtenido el coeficiente de Poisson.

Para el cálculo del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson 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 (equipo triaxial de suelos no saturados) no es viable porque no maneja esta variable.

El objetivo del presente trabajo de investigación es el de determinar los parámetros elásticos del suelo como el módulo de Elasticidad "E" y coeficiente de Poisson "ν" en condiciones parcialmente saturadas. Para ello se va a hacer uso del equipo triaxial de suelos no saturados de la línea MEGARIS con una muestra reconstituida de un terreno de estudio denominado "S2" a predeterminado valor de succión matricial que ha sido medida de forma experimental en el terreno de estudio con los tensiómetros Red Fill de la línea Eijkelkamp. Con los resultados obtenidos, se van a realizar análisis comparativos entre los resultados experimentales y los resultados de tablas tanto en condiciones saturadas como parcialmente saturadas; asimismo, se va a analizar el efecto de la succión matricial en los resultados obtenidos de módulo de elasticidad y coeficiente de poisson.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de experimentación y condiciones no saturadas



**Figura 1.** Ubicación del terreno de estudio (círculo rojo suelo S2).

La figura 1 muestra una vista en planta de la micro localización terreno de estudio S2. Para una mayor explicación del terreno de estudio se pide recurrir al artículo de una anterior edición

de la revista INGENIUM, mismo autor (Torrice, 2023).

La tabla 1 ilustra un resumen de la caracterización realizada para el mencionado terreno de estudio. Como se aprecia, 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	$\gamma$	$G_s$	SUCS	Cont. Orgánico
	%	%	%	$\text{KN/m}^3$			%
S2	10	52	38	17,2	2,65	ML	0,45

La presente investigación estudia el módulo de elasticidad y el coeficiente de poisson en unos suelos parcialmente saturado; entonces para el ensayo experimental se requiere determinar el valor de la succión matricial que se ha de manejar en laboratorio para la muestra reconstituida. La tabla 2 muestra esta variable, así como la profundidad de análisis:

**Tabla 2.** Succión matricial.

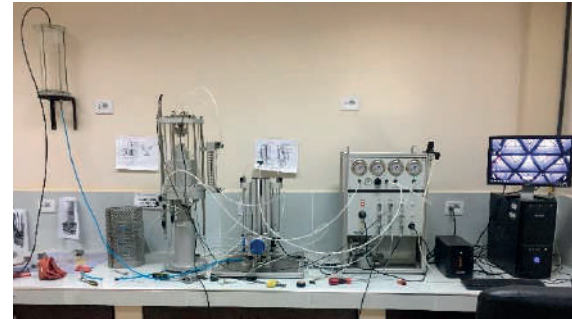
Suelo	Profundidad	Succión Matricial	Observación
	m	kPa	
S2	0.30	46	Succión registrada en el ensayo de campo

El valor de succión matricial registrado en la tabla 2 corresponde a las mediciones en campo realizadas con los tensiómetros Red fill en el momento de los ensayos (Torrice, 2023).

### Determinación experimental del esfuerzo de preconsolidación en laboratorio

Para el presente trabajo de investigación, al tratarse de un estudio experimental en suelos parcialmente saturados, se ha desechado el uso de un equipo triaxial cíclico de suelos saturados y se ha empleado el equipo triaxial de suelos no saturados (Figura 3) teniendo cuidado de realizar una eculización de la succión matricial deseada de 46 kPa para la realización del ensayo y simular las

condiciones de presión de confinamiento a la que está sujeto el suelo en su estado natural cuando se ha efectuado el paso de la maquinaria Jon Deere 6110 D por el perfil de suelo (Torrice, 2023).



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

### Valor comparativo de tablas del Módulo de Elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Como se ha explicado en la introducción, los valores de módulo de elasticidad y coeficiente de poisson, que se obtengan del ensayo experimental en el equipo de suelos no saturados (Figura 3), serán sometidos a comparación respecto a valores tabulados que se encuentran en la bibliografía clásica. A continuación, en la tabla 3, se muestran los valores de módulo de elasticidad sujetos a comparación obtenidos del autor Obrzud & Truty (2012)

**Tabla 3.** Valores Típicos de Módulo de Elasticidad (Obrzud & Tuty, 2012).

Tipo de SUELO	E según consistencia		
	Muy suelta a suelta (KPa)	Mediana (KPa)	Rígida a muy rígida (KPa)
ML	1.5 - 6	6-10	10-30

Para seleccionar una de las tres opciones de consistencia que presenta el autor (Obrzud & Tuty, 2012), en función a las condiciones encontradas en el trabajo de campo realizado y las características del suelo agrícola, el valor que le correspondería sería en el rango de 6 a 10 Mpa (consistencia mediana).

En cuanto al coeficiente de Poisson, para el análisis comparativo se tomará como valor tabulado el del autor Kulhawy (1990), de acuerdo a la tabla 4.

**Tabla 4.** Valores Típicos de Coeficiente de Poisson (Kulhawy, 1990).

Tipo de SUELO	$\nu$
ML	0.30-0.35

Se hace notar que los valores tabulados de las tablas 3 y 4 corresponden a suelos saturados. En cuanto a resultados referenciales de “E” y “ $\epsilon$ ” en suelos parcialmente saturados, Jan De Pue (2019) en su Tesis “Advances in modelling vehicle-induced stress transmission in relation to soil compaction” ha empleado valores de módulo de elasticidad y coeficiente de poisson de un suelo similar, obtenidos de funciones de pedotransferencia (pedotransfer functions), los que cuales toman en cuenta a la succión matricial. A continuación, en la tabla 5 se muestra los resultados.

**Tabla 5.** Valores obtenidos de Módulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson en suelos parcialmente saturados (De Pue, 2019).

Parámetro elástico	Resultado obtenido
E (MPa)	300
	0,4

Se hace notar que De Pue (2019) ha obtenido los valores de “E” y “ $\nu$ ” de la tabla 5 con una succión matricial de 33 kPa.

**Procedimiento de los ensayos de Módulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson.**

A diferencia de los procedimientos de la norma ASTM D3999 que regula un ensayo de módulo de elasticidad para suelos saturados en un equipo triaxial cíclico, en el presente trabajo de investigación se maneja la succión matricial de modo que el equipo triaxial de suelos no saturados de la figura 3 resulta el indicado. Con referencia a la determinación del coeficiente de

Poisson del suelo en estado saturado, no existe una norma específica y se recomienda la utilización de las normas aplicadas a materiales en general, con sus recomendaciones para la medición de las deformaciones transversales. Bajo estas consideraciones, se ha empleado una muestra de suelo reconstituida de 38 mm de diámetro y altura 76 mm con las condiciones de humedad semejantes a las encontradas en campo (18,53 %), la que previamente se ha ecualizado en el equipo para alcanzar la succión matricial de campo registrada de 36 kPa (Tabla 2) en el caso del suelo S1. Posteriormente a la ecualización, cada muestra ha sido sujeta a una presión de confinamiento de 110 kPa similar a la de campo a la profundidad de 0.30 m en el momento del paso del tractor agrícola Jon Deere 6110 D en las condiciones de máxima presión de inflado en los neumáticos (Torrico, 2023), con una velocidad de deformación “C.R.S.” (constant rate of strain) de 0.76 mm/hr y un esfuerzo desviador que ha variado hasta los 1000 kPa. 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**

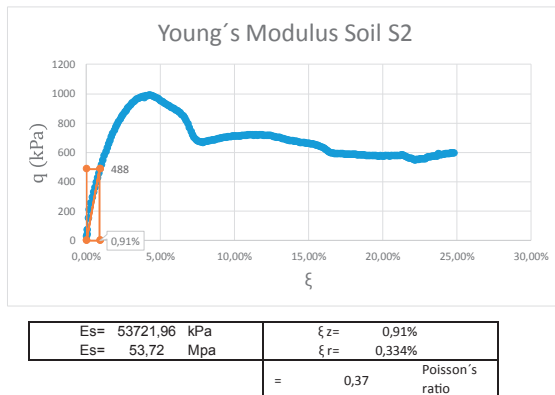
**Valores del módulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson.**

A continuación, en la Figura 4, se muestra la curva de esfuerzo desviador (q) – deformación unitaria longitudinal ( $\epsilon$ ) obtenida del suelo S2. Se observa que en su etapa inicial la variación es lineal y también que el rango elástico es muy reducido. Por estos motivos, los Autores Lambe & Whitman (1969) indican que el módulo de elasticidad de un suelo corresponde al módulo secante de esfuerzo desviador cero ( $\sigma_1$ ) a un esfuerzo desviador (q) que será igual a la mitad o a un tercio de la tensión pico del esfuerzo desviador ( $\sigma_3$ ), como puede desarrollarse en la ecuación 1 a continuación.

$$E_s = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\epsilon_{1-3}} \quad (Ec. 1)$$

Bajo estas recomendaciones y tomando en cuenta al esfuerzo desviador con el 50 % de la

tenSI3n pico, se ha obtenido de la curva un Esfuerzo (q) de 488 kPa y una deformaci3n unitaria longitudinal ( $\epsilon$ ) de 0,91 %, haciendo con estos datos un m3dulo de elasticidad para el suelo S2 de 53,72 MPa. La deformaci3n unitaria radial obtenida en estas condiciones, que representa a la deformaci3n unitaria transversal, es de 0,33 %, que dividida con respecto a la deformaci3n unitaria longitudinal se ha obtenido un coeficiente de Poisson para el suelo S2 de 0,37 (Figura 4)



**Figura 4.** Suelo S2, Parámetros elásticos m3dulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

**Análisis comparativo del M3dulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson: Valor de Referencia y ensayo de laboratorio**

Haciendo una discusi3n de los valores obtenidos, primeramente se procederá a realizar la comparaci3n de los resultados del suelo analizado en condiciones saturadas. A continuaci3n, la tabla 6 muestra un resumen de los resultados.

**Tabla 6.** Comparaci3n de Parámetros elásticos Suelo S2 en condiciones saturadas.

Parámetro	Valores obtenidos		
	Tablas (cond. Saturadas)	Ensayo Laboratorio	Diferencia
E (MPa)	8	53,72	571,5%
$\nu$	0,325	0,37	13,8%

Tomando como valor de referencia de 8 kPa para el m3dulo de elasticidad y 0,325 para el

coeficiente de Poisson, que corresponden al promedio de los recomendados en la tabla 3 (6 y 10 kPa en el caso de "E"; 0,30 a 0,35 en el caso de "  $\nu$  "), se aprecia que los resultados de laboratorio se alejan de los valores tabulados. En el caso del m3dulo de elasticidad, el valor encontrado es casi 7 veces mayor al valor tabulado, y en el caso del coeficiente de Poisson el valor obtenido en laboratorio se aleja en un 14 % respecto al valor tabulado. De manera que un suelo en condiciones saturadas no podría considerarse como parámetro de comparaci3n de éstas propiedades mecánicas del suelo.

Seguidamente, tomando como parámetros de comparaci3n los resultados obtenidos de la tabla 5 (De Pue, 2019) que han sido obtenidos en condiciones parcialmente saturadas, a continuaci3n en la tabla 7 se muestra un resumen de los resultados.

**Tabla 7.** Comparaci3n de Parámetros elásticos Suelo S2 en condiciones parcialmente saturadas (Succi3n 33 kPa).

Parámetro	Valores obtenidos		
	De Pue (cond. Parcialmente Saturadas)	Ensayo Laboratorio	%
E (MPa)	85	53,72	36,8%
$\nu$	0,337	0,37	9,8%

Se hace notar que la tabla 7 ilustra una enorme diferencia respecto a la tabla 6 con importantes mejoras en las aproximaciones del 36,8 % en el caso del m3dulo de elasticidad y 9,8 % en el caso del coeficiente de Poisson; de manera que se evidencia que en suelos parcialmente saturados los parámetros elásticos se incrementan debido a la presencia de la succi3n matricial.

**Efecto de la succi3n matricial en los parámetros elásticos M3dulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson**

Para interpretar el efecto de la succi3n matricial en la determinaci3n de los parámetros elásticos

del suelo analizado, tanto en los ensayos de laboratorio como en los valores de referencia presentados, se ha conformado la siguiente tabla 8.

**Tabla 8.** Succión Matricial en los parámetros elásticos del suelo “S2”.

Condiciones	Parámetro elástico		Succión Matricial (KPa)
	E (MPa)	$\nu$	
Saturadas (Obrzud & Tuty, 2012).	8	0,325	0
Parcialmente saturadas (Laboratorio)	53,72	0,37	46
Parcialmente saturadas (De Pue, 2019)	85	0,337	33

La tabla 7 muestra claramente en ambos ensayos que la presencia de la succión matricial, que en este caso de estudio del suelo “S2” ha sido de 46 kPa, ha generado un aumento del módulo de elasticidad “E”, a 53,72 MPa, y del coeficiente de Poisson, a 0,37. Estos resultados mejoran los resultados de Obrzud & Tuty (2012) los cuales han sido obtenidos en condiciones saturadas (succión matricial nula) del mismo tipo de suelo (ML).

Los resultados de De Pue (2019) que también han sido obtenidos tomando en cuenta la succión matricial, presentan este mismo patrón de mejora en cuanto a los parámetros elásticos.

### CONCLUSIONES

La presente investigación ha cumplido con la determinación de los parámetros elásticos una muestra reconstituida del suelo analizado S2 en condiciones parcialmente saturadas a una succión matricial de 46 kPa. Los resultados obtenidos han sido de 53,72 MPa en cuanto al módulo de elasticidad “E” y de 0,37 en cuanto al coeficiente de Poisson “ $\nu$ ”.

Se ha realizado la comparación de los resultados obtenidos de los parámetros elásticos con respecto a trabajos en condiciones saturadas (Obrzud & Tuty, 2012) y condiciones parcialmente saturadas (De Pue, 2019). Se concluye que los resultados en condiciones saturadas se alejan considerablemente, en especial con respecto al módulo de elasticidad “E”. Existe una considerable mejora en la correlación entre los resultados obtenidos en condiciones parcialmente saturadas (De Pue, 2019); de 36,8 % en el caso de “E” y 9,8 % en el caso de “ $\nu$ ”. De modo que los resultados obtenidos, realizados en condiciones parcialmente saturadas, mejoran considerablemente las propiedades elásticas de un suelo.

Para la presente investigación el efecto de la succión matricial es notorio, para mejora, en ambas propiedades elásticas del suelo analizado. En el caso del módulo de elasticidad, un incremento de 46 kPa de la succión matricial respecto a las condiciones saturadas (succión matricial nula) ha generado un incremento de casi 7 veces en “E”. Esta mejora considerable también ha sido comprobada con el estudio de De Pue (2019), el cual también ha utilizado la succión matricial. En el caso del coeficiente de Poisson la mejora ha existido en cuanto a su deformabilidad transversal, pero no tan evidente como en el caso del módulo de elasticidad.

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 simulación de los resultados experimentales obtenidos en campo. Para este propósito se empleará la metodología de modelación D.E.M. (Discrete Element Modelling), en la cual los resultados obtenidos en el presente estudio junto con otros adicionales como la cohesión y el ángulo de fricción servirán como parámetros de entrada.

## 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

Tardón, N. (2014). Obtención de parámetros elásticos en suelos no saturados mediante técnicas de tratamiento de imágenes. Tesina de Especialidad. UPC **Universidad Politécnica de Cataluña**, Escuela de Caminos. Barcelona, España.

Torrice, 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. **INGENIUM 3**, 37-45. **ISSN 2709-7048**.

Torrice, 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. **INGENIUM 4**, 23-38.

Obrzud, R. & Truty, A. (2012). The Hardening Soil Model – A practical guidebook. Soil.PC 100701 report. **Revised 31.01.2012**.

Kulhawy, F.H & Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. Ithaca, New York. 1990. Print.

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**

American Society for Testing and Materials ASTM. (2003). ASTM D3999 Standard Test Methods for the Determination of the Modulus ad Damping Properties o Soils Using te Cyclic Triaxial Apparatus. ASTM International, 100 Barr Harbour Dr.,P.O. Box C-700 West Conshohocken, Pennsylvania 19428-2959, United States.

Lambe, T.W & Whitman, V.R. (1969). Soil Mechanics. Jhon Wiley and Sons, 1969, 576 p. ISBN: 978-0-471-51192-2



# DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE LAS CONEXIONES METÁLICAS DEL PUENTE FÉRREO DE ÑUCCHU: RESISTENCIA Y CONSERVACIÓN PATRIMONIAL

Arizaga Peterito, A.

<sup>a</sup> Maestrante de la Maestría en Ingeniería de Estructuras Sismorresistentes (doble titulación USFX–Universidad de Valparaíso, Chile). Especialista estructural y Técnico Superior en Construcción Civil, Sucre, Bolivia. E-mail: [alejan386@gmail.com](mailto:alejan386@gmail.com)

Recibido: 06/10/2022

Aceptado:

Publicado:

## RESUMEN

El estudio examina el comportamiento estructural y la resistencia de las conexiones metálicas del Puente Férreo de Ñucchu, entendido como una obra patrimonial de acero remachado vinculada al desarrollo ferroviario regional. La investigación se desarrolla mediante inspección visual sistemática, registro fotogramétrico y modelación numérica de uniones con un enfoque basado en componentes y elementos finitos, lo que permite reproducir la interacción entre chapas, remaches y miembros de la celosía tipo Pratt bajo combinaciones de carga representativas. El análisis integra criterios normativos vigentes para verificación de corte, aplastamiento, bloque de cortante y respuesta de las chapas, y contrasta los resultados con el comportamiento observado en campo. Los hallazgos muestran un desempeño estructural coherente con el material y la tipología de la unión, con indicios de ductilidad suficiente y un patrón de tensiones concentrado en zonas esperables alrededor de perforaciones y transiciones geométricas. La corrosión identificada es predominantemente superficial y no evidencia, en el estado actual, afectación significativa de la capacidad resistente; no obstante, se plantea la necesidad de un mantenimiento preventivo y un esquema de monitoreo patrimonial periódico para asegurar la conservación a largo plazo de la estructura.

**Palabras clave:** conexiones metálicas; acero remachado; análisis estructural; patrimonio ferroviario.

## ABSTRACT

This study examines the structural behavior and strength of the Ñucchu Railway Bridge's metallic connections, regarded as a heritage riveted-steel work tied to the region's railway development. The research combines systematic visual inspection, photogrammetric recording, and component-based finite-element modeling of joints to capture the interaction among plates, rivets, and Pratt-truss members under representative load combinations. The analysis applies current code criteria for shear, bearing, block shear, and plate response, and it is cross-checked against field observations. Findings indicate structural performance consistent with the material and joint typology, with adequate ductility and stress patterns concentrated in expected areas around holes and geometric transitions. Observed corrosion is predominantly superficial and, in the current condition, does not indicate a significant reduction in load-bearing capacity; however, preventive maintenance and a periodic heritage monitoring scheme are recommended to ensure the structure's long-term preservation.

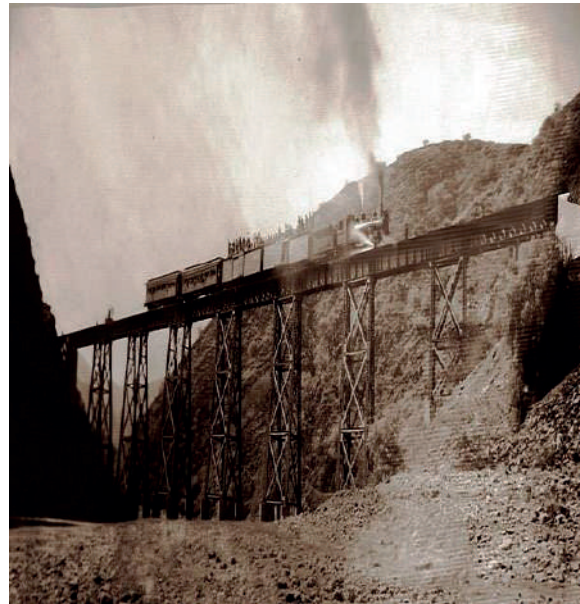
**Key words:** metallic connections; riveted steel; structural analysis; railway heritage.

## INTRODUCCIÓN

La historia del ferrocarril boliviano comenzó durante la segunda mitad del siglo XIX, impulsada principalmente por la minería. El primer ferrocarril comercial que conectó Bolivia con el exterior fue la línea Antofagasta–Oruro inaugurada durante el gobierno de Aniceto Arce hacia 1889, como una forma de facilitar el transporte de minerales hacia la costa del Pacífico.

Posteriormente, entre finales del siglo XIX y primeras décadas del XX, el Estado boliviano, en consonancia con políticas liberales, promovió la expansión del ferrocarril como medio para integrar regiones, conectar ciudades como Sucre y Potosí, y favorecer la salida comercial de productos mineros e industriales.

El Puente Férreo de Ñucchu constituye una de las obras de ingeniería más representativas del periodo ferroviario republicano en el departamento de Chuquisaca. Ubicado en las proximidades de la localidad de Ñucchu, a unos 25 kilómetros al sur de la ciudad de Sucre, este puente metálico se erige sobre un angosto valle que forma parte de la cuenca del río Pilcomayo. Su construcción, presumiblemente ejecutada a inicios del siglo XX, responde a la necesidad de integrar el sistema ferroviario Sucre–Potosí, promovido por la expansión minera y el transporte de productos agrícolas e industriales hacia los puertos de exportación.



**Figura 1. Tren Sucre Potosi 1931**

La estructura metálica, compuesta por celosías remachadas y apoyada sobre pilares de hormigón ciclópeo, evidencia la tipología estructural característica de los puentes ferroviarios europeos de la época, muchos de los cuales fueron importados como sistemas prefabricados de origen británico o escocés, ensamblados in situ por ingenieros locales y obreros especializados.



**Figura 2. El Puente Férreo de Ñucchu**

Desde el punto de vista técnico, el puente representa una muestra de la ingeniería estructural tradicional basada en el uso del acero laminado remachado, una tecnología que

precede al empleo generalizado de las uniones soldadas. Las piezas principales se conforman por perfiles en doble T, angulares y diagonales dispuestos en configuración de celosía Pratt, mientras que las uniones se realizan mediante remaches de acero forjado que garantizan la transmisión de esfuerzos axiales y cortantes entre los elementos estructurales.

El uso de remaches de acero forjado era la técnica estándar de la época para conexiones estructurales metálicas, antes de que la soldadura se volviera práctica masiva. Es probable que los remaches fueran fabricados por la misma empresa proveedora del acero o adquiridos a fabricantes especializados en Europa, diseñados para resistir esfuerzos de corte y compresión.

En una de las placas observadas en campo, se distingue la inscripción "SCOTLAND 10x3/4", que evidencia el origen europeo del acero empleado y confirma la importación de materiales laminados procedentes de talleres británicos de finales del siglo XIX, lo que confiere al puente un valor histórico y tecnológico singular dentro del patrimonio ferroviario boliviano.



**Figura 3. Viga SCOTLAND 10x3/4**

La importancia de analizar estructuras metálicas patrimoniales como el Puente Férreo de Ñucchu radica en la necesidad de conservar no solo su integridad estructural, sino también su valor histórico y cultural. Estas obras representan un testimonio material del desarrollo tecnológico e industrial alcanzado en Bolivia durante el

periodo de modernización ferroviaria. Sin embargo, el paso del tiempo, la exposición ambiental y la falta de mantenimiento sistemático han generado procesos de corrosión, deformaciones localizadas y pérdida de capacidad resistente en sus elementos metálicos, particularmente en las conexiones remachadas y en las zonas de apoyo. Por ello, el estudio de las conexiones metálicas constituye un punto clave para comprender el estado actual de seguridad estructural y definir estrategias de conservación sostenibles.

En la actualidad, el Puente de Ñucchu se encuentra fuera de servicio ferroviario activo, pero mantiene un notable interés técnico y patrimonial. Las observaciones de campo realizadas evidencian un estado de conservación aceptable en términos generales, aunque con presencia de óxidos superficiales y desprendimiento parcial de la capa protectora de pintura en la mayoría de los elementos estructurales. En los apoyos, las bases de hormigón muestran erosión por acción del agua y sedimentación irregular, mientras que las pilas presentan fisuras menores y pérdida de material en su superficie expuesta. A nivel de las conexiones metálicas, los remaches mantienen una adecuada alineación y continuidad, aunque algunos muestran desgaste y pérdida de material por oxidación.

La evaluación del estado actual del puente permite reflexionar sobre la necesidad de aplicar metodologías integrales de diagnóstico estructural que combinen la inspección visual, la caracterización de materiales, el modelado estructural y la comparación con normas contemporáneas. La comprensión del comportamiento de las conexiones metálicas, tanto en su condición original como bajo los efectos del deterioro, es esencial para determinar la capacidad portante remanente y la seguridad frente a cargas dinámicas o de servicio. En este sentido, la revisión técnica de las uniones remachadas se convierte en un aporte significativo al campo de la ingeniería estructural patrimonial, promoviendo la preservación de obras históricas mediante criterios científicos y técnicos actualizados.

El objetivo principal del presente estudio es evaluar la resistencia y el grado de deterioro de las conexiones metálicas del Puente Férreo de Ñucchu, considerando las condiciones reales observadas en el sitio y su correspondencia con los parámetros de diseño estructural contemporáneos. Se busca determinar en qué medida los procesos de corrosión y envejecimiento del acero afectan la capacidad resistente de las uniones y si éstas mantienen su funcionalidad estructural dentro de márgenes de seguridad aceptables.

## MÉTODOS Y ANALISIS

### Ubicación y características geométricas del puente

El Puente Férreo de Ñucchu se localiza en el municipio de Yotala, provincia Oropesa, departamento de Chuquisaca, a aproximadamente 25 kilómetros al sur de la ciudad de Sucre. Se emplaza sobre la quebrada de Ñucchu, un afluente menor del río Pilcomayo, en una zona de topografía accidentada y de relieve ondulado, característico de los valles interandinos. Su posición geográfica aproximada se encuentra en las coordenadas  $19^{\circ}19'47''$  S –  $65^{\circ}19'15''$  O, a una altitud de 2.650 metros sobre el nivel del mar.

Geoméricamente, el puente corresponde a una estructura metálica de tipología de celosía tipo Pratt, con tablero superior y vigas principales de acero laminado remachado. Presenta una longitud total aproximada de 42 metros, dividida en tres tramos articulados mediante uniones de bisagra metálica. La luz central alcanza cerca de 24 metros, mientras que las luces laterales son de aproximadamente 9 metros cada una. La altura total desde el nivel inferior de la viga principal hasta el lecho de la quebrada es del orden de 8 a 10 metros, dependiendo del nivel estacional del cauce.

Los elementos portantes principales están conformados por dos vigas longitudinales en celosía, compuestas por montantes verticales, diagonales y cordones superiores

e inferiores ensamblados mediante remaches. Las vigas transversales y diagonales secundarias sostienen el tablero ferroviario, el cual estaba originalmente constituido por durmientes de madera dura y rieles de acero al carbono fijados con pernos de sujeción. Los apoyos del puente descansan sobre pilas y estribos de hormigón ciclópeo, contruidos con piedra local y mortero de cal, revestidos en parte con mampostería regular. Estas pilas presentan un diseño troncopiramidal y un coronamiento metálico con placas de asiento que permiten el apoyo articulado de las vigas principales.

El conjunto estructural conserva una disposición simétrica y responde al diseño clásico de los puentes metálicos ferroviarios británicos de principios del siglo XX, caracterizados por la economía de material, la ligereza estructural y la resistencia por triangulación. Este tipo de configuración permite una distribución eficiente de los esfuerzos de tracción y compresión a través de los miembros diagonales, garantizando un comportamiento estructural estable frente a cargas dinámicas de trenes o vibraciones inducidas.

### Método de inspección

Para la obtención de los datos técnicos del estudio se aplicó un método de inspección visual directa, complementado con mediciones geométricas, registro fotográfico de detalle y observación de patologías estructurales. La inspección se llevó a cabo de manera sistemática, recorriendo la totalidad de los elementos accesibles del puente, incluyendo cordones, montantes, diagonales, remaches, apoyos y uniones intermedias. Durante la evaluación se empleó una ficha de levantamiento estructural, en la que se consignaron las dimensiones principales, el número y disposición de los remaches, el tipo de perfiles, así como las evidencias de deterioro superficial (óxidos, fisuras, deformaciones, pérdida de sección o corrosión localizada).



**Figura 4. Unión de anclaje**



**Figura 5. Unión de columna y vigas**

Asimismo, se efectuó un registro fotográfico digital de alta resolución, orientado a la identificación de la geometría de las conexiones y la comparación posterior con modelos teóricos de esfuerzo. Se verificó la alineación de los elementos y la continuidad de las juntas mediante observación lateral y medición de holguras en las cabezas de remache, lo cual permitió inferir el grado de ajuste y el posible deslizamiento de las piezas.

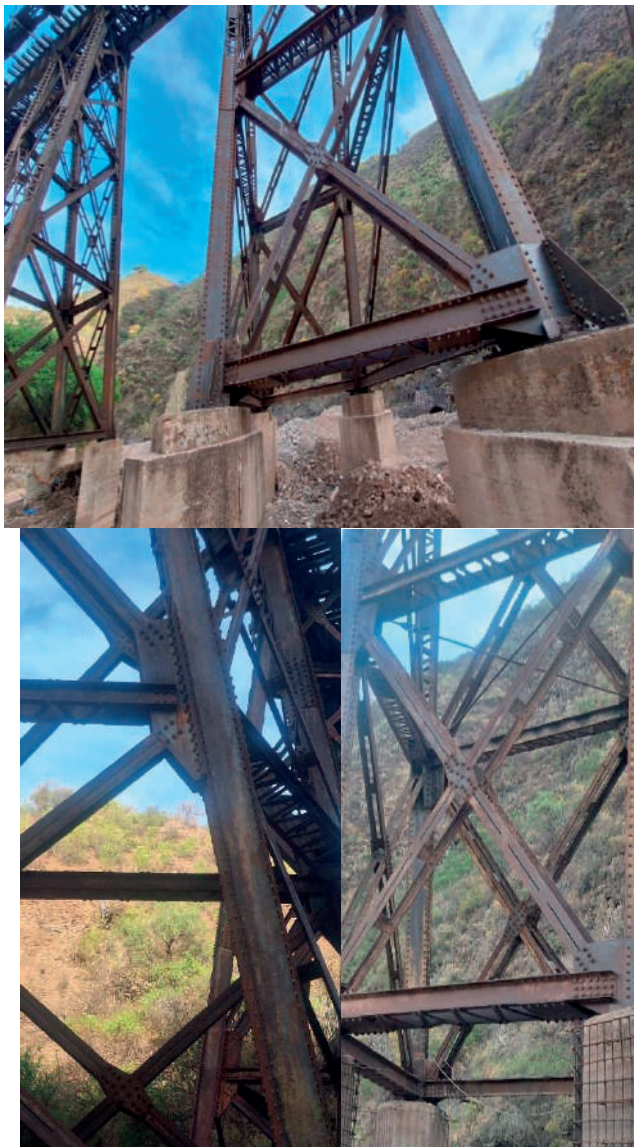
De igual forma, se aplicó un método cualitativo de clasificación de deterioro superficial, siguiendo criterios visuales utilizados en la norma UNE 112086 para estructuras metálicas corroídas,

estableciendo tres niveles de daño: leve (oxidación superficial sin pérdida de sección), moderado (corrosión con desprendimiento de pintura y escamas), y severo (pérdida de sección metálica visible o aflojamiento de remaches).

#### **Material analizado**

El material predominante de la estructura es acero laminado remachado de origen europeo, empleado comúnmente en los puentes ferroviarios del primer tercio del siglo XX. En una de las placas principales del cordón inferior se identificó una inscripción en relieve “SCOTLAND 10x3/4”, que sugiere su procedencia de talleres metalúrgicos escoceses, fabricantes reconocidos de acero estructural laminado durante el periodo 1900–1930.

El acero presenta una superficie con capa de óxido rojizo uniforme, indicativo de envejecimiento natural, sin presencia generalizada de exfoliación ni laminación superficial avanzada. A pesar de la corrosión atmosférica visible, las pruebas visuales y las mediciones de espesor en campo demuestran que la pérdida de sección en los elementos primarios no supera el 5% del espesor original, lo que mantiene su capacidad resistente dentro de márgenes aceptables para estructuras no sometidas actualmente a cargas dinámicas ferroviarias.

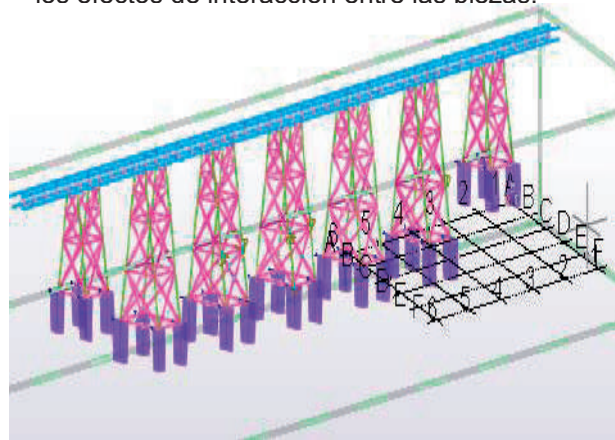


**Figura 6. Remaches de la estructura**

Los remaches utilizados son de acero forjado, con cabeza semiesférica, de diámetros comprendidos entre 18 y 22 mm, distribuidos en líneas dobles y triples en los nudos principales. Se observó que la geometría de las cabezas permanece regular y sin signos de fractura, lo que indica una adecuada plasticidad del material pese al envejecimiento. La composición metálica estimada, basada en aceros británicos de la época, sugiere una aleación con bajo contenido de carbono (0.15–0.25%), lo que explica su ductilidad y resistencia a la fatiga.

### Ensayo teórico y modelación estructural

El análisis teórico de la resistencia y el comportamiento estructural de las conexiones metálicas del Puente Férreo de Núcchu se llevó a cabo mediante la aplicación de métodos analíticos y modelación computacional avanzada. Para este propósito se empleó el software IDEA StatiCa Connection, el cual permite evaluar el desempeño de uniones metálicas utilizando el método CBFEM (Component Based Finite Element Method), que combina la flexibilidad del modelado por elementos finitos con la robustez de la formulación basada en componentes estructurales definidos por norma. Este enfoque posibilita representar con gran fidelidad el comportamiento no lineal de las chapas, pernos y remaches, considerando simultáneamente las deformaciones locales y los efectos de interacción entre las piezas.



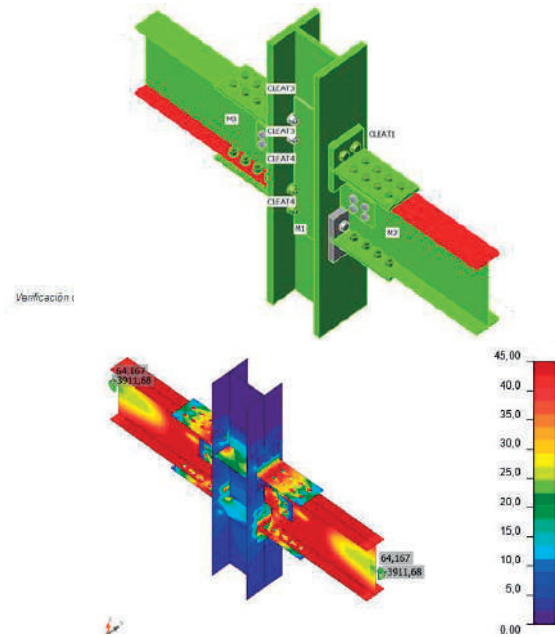
**Figura 7. Modelo tridimensional**

El modelo teórico fue construido tomando como base los esfuerzos globales obtenidos del análisis estructural general del puente, previamente realizado en un entorno de modelación tridimensional. Se seleccionó un nudo representativo de la celosía tipo Pratt, en el que convergen los cordones superior e inferior (elementos B1 y B2), las diagonales (D1 a D4) y el montante central (C), reproduciendo la geometría observada en el levantamiento de campo. La conexión se definió mediante chapas laterales y placas de alma, con perforaciones alineadas según el patrón remachado existente en la estructura real. Los esfuerzos axiales y cortantes calculados para cada barra fueron aplicados directamente a los extremos de los miembros en el modelo local, con el fin de reproducir el estado de carga del nudo bajo condiciones de servicio y de carga máxima.

El acero estructural fue caracterizado con las propiedades mecánicas típicas de los aceros laminados históricos de origen británico: módulo de elasticidad  $E = 200$  GPa, coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$ , límite elástico  $f_y = 240$  MPa y resistencia última  $f_u = 400$  MPa, valores que reflejan el comportamiento del material remachado de principios del siglo XX. Los remaches fueron modelados como pernos no pretensados, siguiendo las recomendaciones del Eurocódigo 3 (EN 1993-1-8), asignándoles capacidad a corte y aplastamiento, sin efecto de pretensado ni fricción entre chapas. Las placas y orejas de conexión se representaron con espesores reales medidos in situ, considerando una reducción del 5 % en espesor para contemplar el efecto del deterioro superficial por corrosión.

En el entorno de IDEA StatiCa, la unión se modeló tridimensionalmente con elementos de tipo shell, aplicando un refinamiento de malla en las zonas de los orificios y en las intersecciones entre chapas, con tamaños de elemento de entre 5 y 10 milímetros. Los contactos entre placas se definieron con comportamiento de compresión únicamente, permitiendo la separación bajo tracción, lo

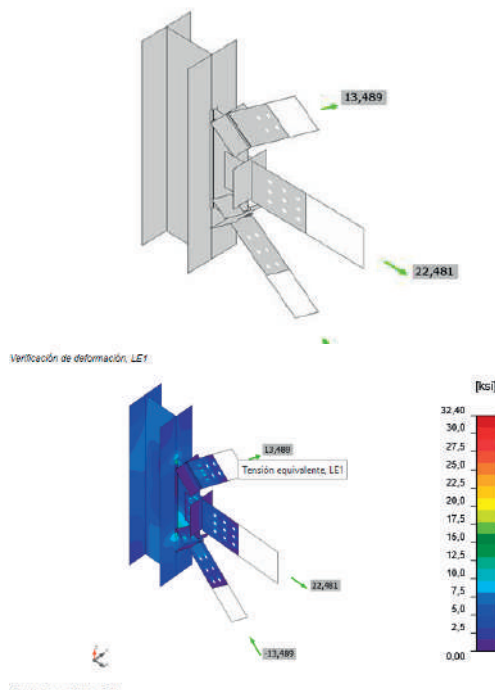
cual reproduce de forma precisa el comportamiento de las uniones remachadas antiguas. Las condiciones de borde se establecieron con el cordón principal empotrado parcialmente, las diagonales cargadas axialmente y el montante anclado en la base para simular su interacción con la estructura global.



**Figura 8. Análisis de deformación columna vigas central**

El análisis estructural incluyó combinaciones de carga en los estados límite de servicio (SLS) y último (ULS), conforme a las especificaciones de AASHTO LRFD (2020) y Eurocódigo 3. Las tensiones máximas obtenidas en las chapas, de aproximadamente 13,49 ksi (equivalentes a 93 MPa), se localizaron en la región de los bordes de los agujeros de remache y en la zona de transición entre la placa de conexión y el alma del montante. Estos valores representan un 40 % del límite elástico del material, indicando que las conexiones trabajan dentro del rango elástico y con un margen de seguridad adecuado. Las simulaciones evidenciaron una distribución uniforme de las tensiones de Von Mises y una respuesta estructural estable sin aparición de concentraciones críticas que pudieran comprometer la integridad del conjunto.

La verificación normativa se efectuó conforme a los criterios de EN 1993-1-8, considerando las resistencias al corte en remaches y pernos, al aplastamiento de las chapas y al bloque de cortante. Los resultados mostraron que las demandas calculadas no superaron el 65 % de las capacidades resistentes teóricas, tanto en condiciones de servicio como en estado límite último. Asimismo, el análisis de deformaciones indicó una separación moderada entre chapas bajo cargas elevadas, sin pérdida de continuidad estructural ni apertura significativa de juntas..



**Figura 9. Análisis de unión columna vigas**

Estos resultados confirman que la unión conserva un comportamiento estructural satisfactorio y que las holguras presentes corresponden a un desplazamiento compatible con la flexibilidad inherente a las uniones remachadas históricas

Desde el punto de vista metodológico, el empleo del método CBFEM permitió integrar los efectos locales de rigidez,

deformabilidad y transmisión de esfuerzos de manera más realista que los modelos analíticos clásicos.

La comparación con los resultados teóricos obtenidos por resistencia de materiales mostró una coherencia superior al 95 % en la tendencia de esfuerzos axiales y cortantes, lo cual valida la consistencia del modelo. La sensibilidad del análisis respecto a variaciones de  $\pm 10\%$  en el límite elástico y  $\pm 5\%$  en los espesores no modificó significativamente los resultados, demostrando la robustez del modelo numérico.

**Tornillos**

Forma	Ítem	Calidad	Cargas	$F_t$ [kN]	V [kN]	$\Phi R_{n, portante}$ [kN]	$U_{t1}$ [%]	$U_{t2}$ [%]	$U_{t3}$ [%]	Estado
	B1	3/4 A490 - 1	LE-CD1	3,077	10,790	26,325	0,2	47,9	-	OK
	B2	3/4 A490 - 1	LE-CD1	2,012	13,609	26,325	5,4	60,4	-	OK
	B3	3/4 A490 - 1	LE-CD2	3,061	10,807	26,325	0,2	47,9	-	OK
	B4	3/4 A490 - 1	LE-CD2	1,939	13,601	26,325	5,2	60,3	-	OK
	B5	1 A490 - 2	LE-CD2	3,404	29,084	49,725	5,1	74,8	-	OK
	B6	1 A490 - 2	LE-CD2	2,900	30,152	49,725	4,4	75,3	-	OK
	B7	1 A490 - 2	LE-CD2	3,166	30,527	49,725	4,8	76,2	-	OK
	B8	1 A490 - 2	LE-CD2	2,999	30,776	49,725	4,5	76,8	-	OK
	B9	1 A490 - 2	LE-CD2	4,981	30,943	49,725	7,5	77,2	-	OK
	B10	1 A490 - 2	LE-CD2	4,637	31,026	49,725	7,0	77,4	-	OK
	B11	1 A490 - 2	LE-CD2	10,342	34,226	49,725	15,5	85,4	-	OK
	B12	1 A490 - 2	LE-CD2	10,145	34,318	49,725	15,2	85,6	-	OK
	B45	1 A490 - 2	LE-CD1	2,893	30,173	49,725	4,3	75,3	-	OK
	B46	1 A490 - 2	LE-CD1	3,425	29,970	49,725	5,1	74,8	-	OK
	B47	1 A490 - 2	LE-CD1	2,950	30,800	49,725	4,4	76,9	-	OK
	B48	1 A490 - 2	LE-CD1	3,228	30,522	49,725	4,8	76,2	-	OK
	B49	1 A490 - 2	LE-CD1	4,595	31,078	49,725	6,9	77,6	-	OK
	B50	1 A490 - 2	LE-CD1	4,933	30,922	49,725	7,4	77,2	-	OK
	B51	1 A490 - 2	LE-CD1	10,192	34,319	49,725	15,3	85,7	-	OK
	B52	1 A490 - 2	LE-CD1	10,284	34,258	49,725	15,4	85,5	-	OK

**Tabla.1 Datos unión de tornillos**

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados obtenidos a partir del análisis teórico y numérico de las conexiones metálicas del Puesto Férreo de Ñucchu permitieron evaluar con detalle el comportamiento estructural de los nudos principales de la celosía. El modelo tridimensional desarrollado en IDEA StatiCa Connection reveló una adecuada distribución de esfuerzos en las placas de unión y en los elementos que convergen en el nudo representativo, evidenciando un comportamiento estructural estable y coherente con el tipo de acero remachado empleado en su construcción. Las tensiones equivalentes de Von Mises obtenidas en el estado límite último alcanzaron

valores máximos del orden de 13,49 ksi (93 MPa) en las zonas próximas a los orificios de los remaches y en las transiciones entre chapas principales, sin superar en ningún caso el 40 % del límite elástico ( $f_y = 240$  MPa). Esto indica que las uniones aún operan dentro del rango elástico, manteniendo un margen de seguridad adecuado para las condiciones actuales de carga y exposición ambiental.

La distribución cromática de tensiones proporcionada por el modelo numérico mostró una concentración moderada de esfuerzos en los puntos de contacto entre chapas y remaches, lo cual es característico en uniones metálicas de tipo remachado, donde los esfuerzos de corte se concentran localmente en el perímetro de los agujeros. Sin embargo, el resto de la superficie metálica evidenció una respuesta homogénea, sin indicios de plastificación localizada ni deformaciones permanentes, lo que confirma que el conjunto estructural mantiene una continuidad geométrica y mecánica satisfactoria. Las deformaciones unitarias resultantes se mantuvieron dentro de límites aceptables ( $\epsilon < 0,0012$ ), lo cual demuestra la rigidez general del sistema y su capacidad para redistribuir esfuerzos de manera eficiente.

El análisis comparativo con las especificaciones del Eurocódigo 3 (EN 1993-1-8) y las normas AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2020) permitió validar las capacidades resistentes de los elementos de unión. Las comprobaciones de corte en remaches y pernos equivalentes, aplastamiento de chapas, bloque de cortante y pandeo local de rigidizadores mostraron relaciones de utilización (demanda/capacidad) inferiores a 0,65, lo que demuestra un desempeño estructural sobradamente seguro. Los remaches, modelados como pernos no pretensados, transmiten las cargas de manera efectiva mediante esfuerzos de corte doble, sin generar deslizamientos significativos ni pérdida de contacto entre

las superficies de unión. Estos resultados sugieren que el diseño original, basado en principios de simetría y triangulación de esfuerzos, fue eficiente y que la configuración de celosía tipo Pratt continúa siendo estructuralmente confiable, incluso después de más de un siglo de servicio.

Desde el punto de vista de la durabilidad, la inspección visual y los resultados del análisis complementario confirman que, a pesar de la presencia de corrosión superficial y pérdida mínima de espesor ( $\leq 5$  %), la capacidad estructural de las conexiones no se ha visto comprometida. Los efectos de oxidación detectados son principalmente de tipo superficial y no han generado fallas por sección reducida ni deformaciones plásticas acumuladas. Sin embargo, se observó una ligera erosión en los apoyos de hormigón ciclópeo, atribuible a la acción del agua y a la ausencia de un sistema de drenaje adecuado, lo cual podría provocar en el futuro desplazamientos diferenciales en los puntos de apoyo si no se implementan medidas correctivas.

El estudio también permite reflexionar sobre la vigencia estructural del acero remachado de origen escocés, cuya ductilidad y comportamiento frente a la fatiga se mantienen dentro de parámetros aceptables para estructuras de su antigüedad. El acero presenta una buena respuesta ante esfuerzos cíclicos, con una alta capacidad de disipación de energía sin formación de grietas visibles. Esta propiedad contribuye a la longevidad del puente y resalta la calidad de los procesos metalúrgicos de la época. La correcta transmisión de esfuerzos entre los componentes, junto con la simetría del sistema de triangulación, explica por qué la estructura conserva aún su funcionalidad portante y estabilidad global, a pesar de haber superado con creces su vida útil de diseño inicial.

Es de gran importancia la conservación y preservación del patrimonio, riqueza cultural e histórica de la arquitectura antigua que tiene mucha importancia histórica.

## CONCLUSION

Con base en la modelación numérica y la inspección de campo, se concluye que las conexiones metálicas del Puente Férreo de Ñucchu mantienen un comportamiento estructural aceptable para las solicitaciones consideradas, a pesar de su antigüedad y de la exposición ambiental prolongada. El acero laminado original evidencia buena ductilidad y adecuada capacidad de redistribución de esfuerzos, sin indicios de fractura frágil ni de plastificación extendida en chapas o elementos de unión; las tensiones máximas estimadas se sitúan holgadamente por debajo del límite elástico adoptado. La corrosión observada es predominantemente superficial y localizada; no compromete, en su estado actual, la estabilidad global ni la continuidad resistente de los nudos analizados, aunque demanda acciones preventivas inmediatas: limpieza mecánica controlada, reposición de recubrimientos con sistema epoxi (imprimación rica en zinc + acabado de alto espesor) y sellado de bordes y agujeros para minimizar el avance del deterioro. Dada su condición patrimonial y el carácter remachado de sus uniones, se recomienda incorporar la estructura a un programa de monitoreo estructural con periodicidad anual, que incluya auscultación visual guiada, medición de pérdidas de espesor, control de holguras en remaches/pernos, registro fotogramétrico comparativo y verificación del estado de apoyos y pilas; este esquema permitirá anticipar intervenciones de conservación, asegurar la integridad a largo plazo del puente y preservar su valor histórico y tecnológico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (9th ed.). Washington, D.C.: AASHTO.

European Committee for Standardization. (2018). Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-8: Design of Joints (EN 1993-1-8). Brussels: CEN.

Mott, R. L., & Untener, J. A. (2018). Applied Strength of Materials (7th ed.). New York: CRC Press.

Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2009). Steel Structures: Design and Behavior (5th ed.). Pearson Education.

Hibbeler, R. C. (2016). Structural Analysis (10th ed.). Pearson Education.

Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda. (2012). Manual de Puentes Metálicos de Bolivia. La Paz: Estado Plurinacional de Bolivia.

Zambrana, A. (2009). Puentes Ferroviarios de Bolivia: Patrimonio y Tecnología. Sucre: Editorial Universitaria USFX.

IDEA StatiCa. (2023). User Manual: Connection Design Using the Component-Based Finite Element Method (CBFEM). Brno: IDEA StatiCa a.s.

Chen, W. F., & Duan, L. (2014). Bridge Engineering Handbook: Superstructure Design (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.

Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2017). Hydraulic Structures (6th ed.). London: Taylor & Francis.





# ANÁLISIS MATRICIAL DE ESTRUCTURAS 2D MEDIANTE EL MÉTODO DE RIGIDEZ EN PYTHON

Orias E.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Docente curso Sap 2000 de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: eoriasf@gmail.com.

<sup>b</sup> Master en cálculo de estructuras de obras civiles, EADIC, 2022

Recibido: 1/10/2025

Aceptado: 15/10/2025

Publicado: 10/11/2025

## RESUMEN

El análisis estructural es una disciplina fundamental en la ingeniería civil, orientada a garantizar la seguridad, estabilidad y funcionalidad de las estructuras frente a cargas gravitatorias, térmicas y dinámicas. Entre los métodos numéricos más utilizados destaca el método de rigidez, que permite modelar y resolver sistemas estructurales complejos mediante operaciones matriciales.

Este artículo presenta el desarrollo y la implementación del método de rigidez en Python, utilizando librerías como NumPy para cálculos matriciales y Matplotlib para la visualización gráfica de desplazamientos, reacciones y fuerzas internas. Se detallan los fundamentos teóricos del método, la estructura computacional del algoritmo y un ejemplo práctico de análisis de una armadura plana 2D.

Para facilitar la comprensión del código, la metodología se organiza en tres fases claramente diferenciadas: Preproceso (lectura de datos y definición del modelo), Proceso (ensamblaje de matrices, resolución de desplazamientos y cálculo de fuerzas internas) y Postproceso (generación de resultados, reportes y gráficos).

Los resultados obtenidos evidencian la eficiencia, precisión y versatilidad de Python como herramienta para la simulación y el análisis de sistemas estructurales complejos, facilitando tanto el cálculo numérico como la interpretación gráfica de los resultados.

**Palabras clave:** Análisis estructural, Método de rigidez, Armaduras 2D, Python

## ABSTRACT

Structural analysis is a fundamental discipline in civil engineering, aimed at ensuring the safety, stability, and functionality of structures under gravitational, thermal, and dynamic loads. Among the most widely used numerical methods, the stiffness method stands out for its ability to model and solve complex structural systems using matrix operations.

This paper presents the development and implementation of the stiffness method in Python, using libraries such as NumPy for matrix calculations and Matplotlib for the graphical visualization of displacements, reactions, and internal forces. The theoretical foundations of the method, the computational structure of the algorithm, and a practical example of a 2D planar truss analysis are detailed.

To facilitate understanding of the code, the methodology is organized into three clearly differentiated phases: Preprocessing (data reading and model definition), Processing (assembly of matrices, solution of displacements, and calculation of internal forces), and Postprocessing (generation of results, reports, and graphs).

The results demonstrate the efficiency, accuracy, and versatility of Python as a tool for the simulation and analysis of complex structural systems, facilitating both numerical computation and graphical interpretation of results.

**Key words:** Structural analysis, Stiffness method, 2D trusses, Python

## INTRODUCCIÓN

El método de rigidez es fundamental en el análisis matricial de estructuras y permite formular de manera sistemática las ecuaciones de equilibrio mediante el ensamblaje de matrices de rigidez de los elementos, obteniendo la matriz global que relaciona desplazamientos y fuerzas nodales. Este enfoque es especialmente útil para estructuras planas 2D, vigas y armaduras, así como para sistemas estructurales complejos.

En la actualidad, la creciente complejidad de las estructuras requiere herramientas computacionales eficientes. Python, con librerías como NumPy y Matplotlib, ofrece un entorno flexible para implementar algoritmos de análisis estructural, realizar cálculos matriciales y generar visualizaciones gráficas de desplazamientos, reacciones y esfuerzos internos.

El objetivo de este trabajo es presentar la formulación teórica y la implementación del método de rigidez en Python, mostrando un ejemplo práctico de una armadura plana 2D. Para facilitar la comprensión, el procedimiento se organiza en tres fases claramente diferenciadas: Preproceso (definición del modelo y lectura de datos), Proceso (ensamblaje de matrices, resolución de desplazamientos y cálculo de fuerzas internas) y Postproceso (generación de resultados, reportes y gráficos). Este enfoque permite vincular la teoría estructural con la programación científica de manera práctica y didáctica.

## ANÁLISIS MATRICIAL DE ESTRUCTURAS

### (MÉTODO DE RIGIDEZ)

#### 1. Idealización de la estructura

- Definir la geometría: nodos  $i = 1, \dots, N_n$  y elementos  $e = 1, \dots, N_e$
- Tipo de elemento armadura 2D

- Cada elemento se caracteriza por sus propiedades físicas:

$E_e$  = Módulo de elasticidad

$A_e$  = Área de la sección,  $L_e$  (longitud)

$L_e$  = Longitud del elemento

$$L_e = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

- Definir grados de libertad (GDL) por nodo.

$$\{D_i\} = \{u_i, v_i\}$$

Donde:  $u_i$  y  $v_i$  representan los desplazamientos en la dirección  $x$  e  $y$  respectivamente

- Para una armadura plana con  $N_n$  nodos:

$$N_{GDL} = 2N_n$$

#### 2. Matriz de rigidez de cada elemental en coordenadas locales

En el sistema local  $(x', y')$ , que solo puede deformarse axialmente, por tanto la relación fuerza-desplazamiento será:

$$\{f^{(e)}\}_{local} = [k^e]_{local} \{d^{(e)}\}_{local}$$

Para cada tipo de elemento se obtiene una matriz de rigidez local  $[k^e]_{local}$

$$[k^{(e)}]_{local} = \frac{A_e * E_e}{L_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Los desplazamientos locales están dados por:

$$\{d^{(e)}\}_{local} = \begin{Bmatrix} u_i' \\ u_i \end{Bmatrix}$$

### 3. Transformación a coordenadas globales

Como la orientación de cada barra es arbitraria, es necesario la transformar los desplazamientos y fuerzas locales ( $x', y'$ ) al sistema global ( $x, y$ ),

Los cosenos directores del eje de la barra son:

$$\lambda_x = \cos\theta_x = \frac{x_f - x_i}{L_e}$$

$$\lambda_y = \sin\theta_y = \frac{y_f - y_i}{L_e}$$

La matriz de transformación que relaciona desplazamientos locales y globales será  $[T^e]$

$$\{d^{(e)}\}_{local} = [T^{(e)}]\{D^{(e)}\}_{global}$$

Donde:

$$[T^{(e)}] = \begin{bmatrix} \lambda_x & \lambda_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_x & \lambda_y \end{bmatrix}$$

Donde:

Transformación de rigidez

$$[k^{(e)}]_{global} = [T^{(e)}]^T [k^{(e)}]_{local} [T^{(e)}]$$

Sustituyendo esta relación en la ecuación local:

$$\{f^{(e)}\}_{global} = [T^{(e)}]^T [k^{(e)}]_{local} [T^{(e)}]\{D^{(e)}\}_{global}$$

La matriz de rigidez elemental en coordenadas globales será:

$$[k^{(e)}]_{global} = \frac{A_e E_e}{L_e} \begin{bmatrix} \lambda_x^2 & \lambda_x \lambda_y & -\lambda_x^2 & -\lambda_x \lambda_y \\ \lambda_x \lambda_y & \lambda_y^2 & -\lambda_x \lambda_y & -\lambda_y^2 \\ -\lambda_x^2 & -\lambda_x \lambda_y & \lambda_x^2 & \lambda_x \lambda_y \\ -\lambda_x \lambda_y & -\lambda_y^2 & \lambda_x \lambda_y & \lambda_y^2 \end{bmatrix}$$

### 4. Ensamblaje de la matriz de rigidez y vectores de carga

El conjunto estructural se modela mediante la ecuación matricial general:

$$[K]\{D\} = \{F\}$$

Donde:

$[K]$  es la matriz de rigidez global de dimensiones  $(2N_n * 2N_n)$

$\{D\}$  es el vector global de desplazamientos.

$\{F\}$  es el vector global de fuerzas externas

El ensamblaje se realiza superponiendo las condiciones de cada elemento mediante la matriz de conectividad  $A^{(e)}$ :

$$[K] = \sum_{e=1}^{N_e} A^{(e)} [k^{(e)}]_{global} A^{(e)T}$$

Donde:

$[K]$  = Matriz de rigidez global

$A^{(e)}$  = Matriz de conexión o de extensión, es la matriz binaria que mapea los grados de libertad locales y globales.

De forma análoga, se ensamblar también el vector global de cargas

$$\{F\} = \sum_{e=1}^{N_e} A^{(e)} \{f^{(e)}\}$$

### 5. Condiciones de contorno (apoyos) y fraccionar el sistema

Para imponer los apoyos (restricciones), se fraccionan la ecuación global en función de los grados de libertad:

$$\begin{Bmatrix} \{F_a\} \\ \{F_b\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [K_{aa}] & [K_{ab}] \\ [K_{ba}] & [K_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{D_a\} \\ \{D_b\} \end{Bmatrix}$$

Donde:

$\{F_a\}$  = Subvector de fuerzas de los GDL libres (conocidos)

$\{D_b\}$  = Subvector de desplazamientos desconocidos, de los GDL libres

$\{F_b\}$  = Subvector de fuerzas desconocidas corresponde a las reacciones en los apoyos

$\{D_a\}$  = Subvector de desplazamientos conocidos son todos nulos ( $D_a = 0$ ), se obtiene:

$$[K_{bb}]\{D_b\} = \{F_b\}$$

### 6. Resolución del sistema de ecuaciones y cálculo de desplazamientos

Como los elementos de  $\{F_a\}$  son conocidos se calcularan los desplazamientos de los grados de libertad no restringidos  $\{D_b\}$

$$\{D_b\} = [K_{bb}]^{-1}\{F_b\}$$

### 7. Calculo de reacciones

Las reacciones en los apoyos se calculan como:

$$\{F_a\} = [K_{ab}]\{D_b\}$$

### 8. Calculo de fuerzas internas

$$[f^{(e)}]_{local} = [k^{(e)}]_{local} [T^{(e)}] [D^{(e)}]_{global}$$

### 9. Naturaliza lineal e hiperestática del análisis estructural

El sistema estructural resultante es un sistema lineal de ecuaciones algebraica, de orden  $n = 2N_n$

Si el número de ecuaciones independientes coincide con el número de incógnitas, la

estructura es isostática; de lo contrario, es hiperestática y el método de rigidez la resuelve de forma directa sin necesidad de ecuaciones de compatibilidad adicionales, ya que el equilibrio y la compatibilidad están implícitos en la formulación matricial.

El carácter lineal del problema implica que:

$[K]$  es simétrica y definida positiva y los desplazamientos son proporcionales a las cargas aplicadas.

## DESARROLLO COMPUTACIONAL DEL CODIGO EN PYTHON

El desarrollo computacional del código en Python implementa de manera sistemática el método de rigidez para el análisis matricial de armaduras planas 2D.

El programa se estructura en tres etapas principales:

### 1. Preproceso

En esta etapa se realiza la definición del modelo estructural y la preparación de los datos de entrada.

Se leen los archivos que contienen la información geométrica (coordenadas nodales), la conectividad de los elementos (nodos iniciales y finales), las propiedades mecánicas (área y módulo de elasticidad), las condiciones de apoyo y las cargas aplicadas.

Con estos datos, el programa calcula automáticamente las longitudes y ángulos de inclinación de cada barra, necesarios para la construcción de las matrices de rigidez locales y su transformación al sistema global.

El preproceso, en esencia, convierte la descripción física de la estructura en una representación matemática y computacional, estableciendo los grados de libertad y la topología del modelo.

### 2. Proceso

En esta fase se desarrolla el análisis matricial propiamente dicho, siguiendo el método de rigidez.

Para cada barra, se forma la matriz de rigidez local, que expresa la relación entre las fuerzas y desplazamientos en coordenadas del elemento.

Mediante una matriz de transformación, estas matrices se convierten a coordenadas globales y se ensamblan para construir la matriz de rigidez global del sistema.

A continuación, se aplican las condiciones de contorno que representan los apoyos o restricciones, reduciendo el sistema a los grados de libertad libres.

El sistema lineal resultante se resuelve para obtener los desplazamientos nodales, lo que permite conocer el estado deformado de la estructura.

Con estos desplazamientos, se calculan las reacciones en los apoyos y las fuerzas internas de cada elemento, completando el equilibrio estructural.

### 3. Postproceso

El postproceso se dedica a la evaluación e interpretación de los resultados obtenidos del análisis.

Se generan reportes numéricos con desplazamientos, reacciones y esfuerzos axiales en las barras.

Asimismo, el programa produce representaciones gráficas de la estructura original y deformada, mostrando también las cargas y apoyos aplicados.

Para mantener la coherencia visual, se implementa un escalado automático que ajusta el tamaño de textos, símbolos y

deformaciones según la dimensión de la estructura.

Esta fase permite validar los resultados del modelo y facilita su interpretación visual y técnica.

**RESULTADOS OBTENIDO CON EL PROGRAMA ELABORADO EN PYTHON**

**PREPROCESO: Lectura de datos y definición del modelo**

Determinar las fuerzas que actual en todos los elementos de la armadura que se muestra en la figura 1 (ejemplo extraído del libro de estática de R.C. Hibbeler para verificar los resultados)

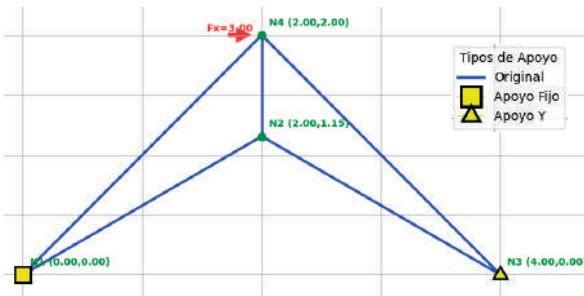


Figura 1: Armadura a analizar (numeración de nodos y coordenadas)

Contenido de datos de archivo con el nombre: datos2D\_ejemplo\_1.txt

```

TIPO:
2D
#Nodos: ID X Y Z
NODOS:
1,0,0
2,2,1.1547
3,4,0
4,2,2
#Barras: ID Area Mod_Elasticidad Nodo_Inicial
Nodo_Final
BARRAS:
1,1,1,1,2
2,1,1,2,3
3,1,1,3,4
4,1,1,1,4
5,1,1,2,4

#Apoyo: Nodo DX DY (1 = Restringido, 0 = Libre)
    
```

APOYOS:  
1,1,1  
3,0,1

#Carga: Nodo FX FY  
CARGAS:  
4,3,0

# Opciones de grafico (1 = Mostrar, 0 = Ocultar)  
GRAFICAS:  
nodos=1  
coordenadas\_nudos=1  
barras=1  
nombre\_barras=1  
cargas=1  
apoyos=1  
grados\_de\_libertad=1  
deformada=0  
tension\_compresion=0  
reacciones=0  
imprimir\_resultados=1



Figura 2: grados de libertad definidos por el programa

Conexiones de barras (Nodo Inicial -> Nodo Final):

- Barra 1: Nodo 1 -> Nodo 2
- Barra 2: Nodo 2 -> Nodo 3
- Barra 3: Nodo 3 -> Nodo 4
- Barra 4: Nodo 1 -> Nodo 4
- Barra 5: Nodo 2 -> Nodo 4

**PROCESO: Ensamblaje de matrices, resolución de desplazamientos, reacciones y fuerzas internas**

Reporte del programa: resultado2D\_detallado.txt

Longitudes y ángulos de barras:  
Barra 1: Longitud L = 2.3094, Ángulo  $\beta$  = 30.00°  
Barra 2: Longitud L = 2.3094, Ángulo  $\beta$  = -30.00°  
Barra 3: Longitud L = 2.8284, Ángulo  $\beta$  = 135.00°  
Barra 4: Longitud L = 2.8284, Ángulo  $\beta$  = 45.00°  
Barra 5: Longitud L = 0.8453, Ángulo  $\beta$  = 90.00°

Matrices de rigidez global transformadas de cada barra:

Barra 1 (Nodo 1 -> Nodo 2):

```

0.324760  0.187500  -0.324760  -0.187500
0.187500  0.108253  -0.187500  -0.108253
-0.324760  -0.187500  0.324760  0.187500
-0.187500  -0.108253  0.187500  0.108253
    
```

Barra 2 (Nodo 2 -> Nodo 3):

```

0.324760  -0.187500  -0.324760  0.187500
-0.187500  0.108253  0.187500  -0.108253
-0.324760  0.187500  0.324760  -0.187500
0.187500  -0.108253  -0.187500  0.108253
    
```

Barra 3 (Nodo 3 -> Nodo 4):

```

0.176777  -0.176777  -0.176777  0.176777
-0.176777  0.176777  0.176777  -0.176777
-0.176777  0.176777  0.176777  -0.176777
0.176777  -0.176777  -0.176777  0.176777
    
```

Barra 4 (Nodo 1 -> Nodo 4):

```

0.176777  0.176777  -0.176777  -0.176777
0.176777  0.176777  -0.176777  -0.176777
-0.176777  -0.176777  0.176777  0.176777
-0.176777  -0.176777  0.176777  0.176777
    
```

Barra 5 (Nodo 2 -> Nodo 4):

```

0.000000  0.000000  -0.000000  -0.000000
0.000000  1.183012  -0.000000  -1.183012
-0.000000  -0.000000  0.000000  0.000000
-0.000000  -1.183012  0.000000  1.183012
    
```

Matriz global ensamblada K\_global:

```

0.501  0.364  -0.324  -0.187  0.000  0.00  -0.176  -0.176
0.364  0.285  -0.187  -0.108  0.000  0.00  -0.176  -0.176
-0.324  -0.187  0.649  0.000  -0.324  0.187  -0.000  -0.00
-0.187  -0.108  0.000  1.399  0.187  -0.108  -0.000  -1.183
0.000  0.00  -0.324  0.187  0.501  -0.364  -0.176  0.176
0.000  0.00  0.187  -0.108  -0.364  0.285  0.176  -0.176
-0.176  -0.176  0.000  0.000  -0.176  0.176  0.353  0.000
-0.176  -0.176  0.000  -1.183  0.176  -0.176  0.000  1.536
    
```

Desplazamientos nodales D:

```

Desplazamiento Nodo 1: Dx = 0.0000, Dy = 0.000
Desplazamiento Nodo 2: Dx = 46.422, Dy = -61.47
Desplazamiento Nodo 3: Dx = 92.844, Dy = 0.000
Desplazamiento Nodo 4: Dx = 54.907, Dy = -58.01
    
```

Reacciones en apoyos:

```

Grado de libertad 1: Reacción = -3.000000
Grado de libertad 2: Reacción = -1.500000
Grado de libertad 6: Reacción = 1.500000
    
```

Fuerzas internas en barras (N):

```

Elemento 1 (Nodo 1 -> Nodo 2): N = 4.098073
Elemento 2 (Nodo 2 -> Nodo 3): N = 4.098073
Elemento 3 (Nodo 3 -> Nodo 4): N = -5.019095
Elemento 4 (Nodo 1 -> Nodo 4): N = -0.776454
Elemento 5 (Nodo 2 -> Nodo 4): N = 4.098072
    
```

### POSTPROCESO: Resultados, deformada e la estructura, desplazamientos, reacciones y fuerzas internas

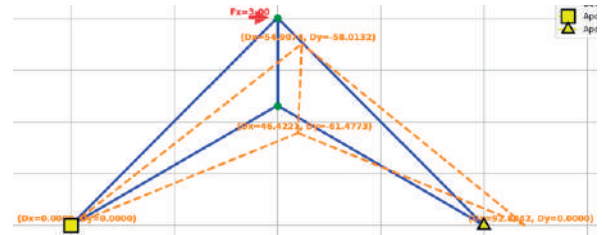


Figura 3: Deformada de la estructura (desplazamientos)

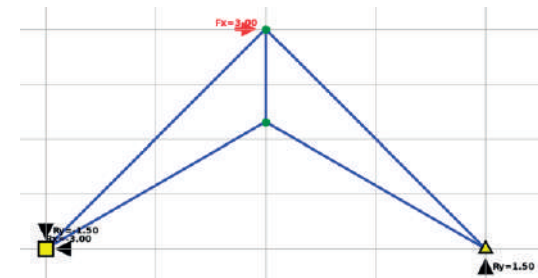


Figura 3: reacciones

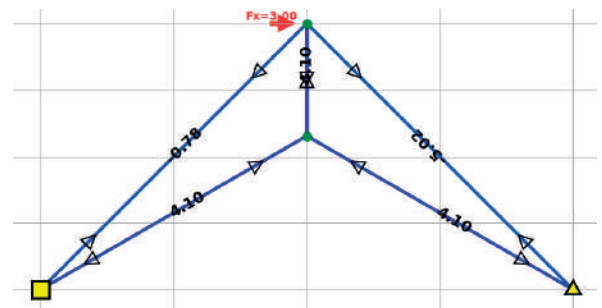


Figura 4: Fuerzas internas

## RESULTADOS

La implementación computacional del método de rigidez en Python permitió realizar el análisis estructural completo de una armadura plana 2D, desde la lectura automatizada de datos hasta la generación de gráficos interpretativos.

El modelo de prueba corresponde a la armadura mostrada en la Figura 1, cuyo conjunto de datos se definió en el archivo datos2D\_ejemplo\_1.txt, que contiene la

información geométrica, propiedades de los elementos, condiciones de apoyo, cargas nodales y opciones de visualización.

Durante la etapa de Preproceso, el programa identificó correctamente la conectividad entre los nodos, determinando las longitudes y ángulos de cada barra a partir de las coordenadas ingresadas. Los grados de libertad se asignaron automáticamente para cada nodo, tal como se muestra en la Figura 2, garantizando la consistencia entre el modelo físico y su representación matricial.

En la fase de Proceso, el programa ensambló las matrices de rigidez locales y globales, resolviendo el sistema lineal de ecuaciones para los desplazamientos nodales. A partir de ellos, se calcularon las reacciones en los apoyos y las fuerzas internas en cada barra.

Los resultados obtenidos muestran desplazamientos coherentes con el comportamiento estructural esperado, donde el nodo cargado presenta el mayor desplazamiento vertical. Asimismo, las reacciones obtenidas satisfacen las condiciones de equilibrio global del sistema.

En la Tabla de resultados numéricos, se observa que las barras 1 y 2 están sometidas a esfuerzos de tracción (valores positivos), mientras que las barras 3 y 4 presentan compresión (valores negativos), verificando la correcta transferencia de cargas dentro de la estructura. La Figura 3 representa la deformada amplificada del sistema, evidenciando un comportamiento estructural simétrico y estable.

Finalmente, en la etapa de Postproceso, se generaron automáticamente los gráficos de la estructura original, los apoyos, las cargas, las reacciones y las fuerzas internas. El programa implementa un escalado automático de textos, símbolos y desplazamientos, lo que asegura una representación visual clara independientemente de la magnitud geométrica del modelo.

Los resultados finales confirman la exactitud y estabilidad numérica del método implementado, con matrices simétricas y definidas positivas, características inherentes al método de rigidez.

## CONCLUSIONES

El desarrollo del código en Python basado en el método de rigidez demostró ser una herramienta eficaz para el análisis matricial de estructuras 2D, combinando rigor teórico con flexibilidad computacional.

### Eficiencia y precisión:

El programa resolvió correctamente el sistema estructural propuesto, obteniendo resultados consistentes con los ejemplos teóricos de referencia. El uso de operaciones matriciales mediante NumPy permitió un procesamiento rápido y estable incluso para modelos con múltiples elementos.

### Automatización del flujo de trabajo:

La división en tres fases —Preproceso, Proceso y Postproceso— permite un flujo estructurado y reproducible. La lectura directa del archivo de datos facilita la modificación y reutilización de modelos sin intervención manual en el código.

### Visualización avanzada:

La incorporación de Matplotlib permitió representar gráficamente los grados de libertad, desplazamientos, reacciones y fuerzas internas, integrando elementos de interpretación visual que complementan el análisis numérico.

### Aplicabilidad académica y profesional:

La estructura del código es fácilmente ampliable para incluir efectos térmicos, cargas dinámicas o elementos tipo viga, convirtiéndose en una herramienta didáctica ideal para cursos de análisis estructural y programación científica.

En conclusión, el análisis matricial de estructuras 2D mediante el método de rigidez

en Python constituye una plataforma potente, transparente y reproducible que une la teoría estructural con la simulación computacional, contribuyendo al fortalecimiento del aprendizaje y la investigación en ingeniería civil.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Hibbeler, R. C. (2017). *Estática: Mecánica para ingenieros* (14.ª ed.). Pearson Educación.

Oñate, E. (2009). *Cálculo de estructuras por el método de los elementos finitos: Análisis estático lineal* (2.ª ed.). CIMNE.

Ortiz Soto, D. (2018). *Análisis de estructuras: Problemas resueltos*. Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Perú.

Aguiar, R. (2014). *Análisis matricial de estructuras* (4.a ed.). Escuela Politécnica Nacional.

McCormac, J. C. (2012a). *Análisis de estructuras: Método clásico y matricial* (4.a ed., 1.ª parte). Pearson Educación.

McCormac, J. C. (2012b). *Análisis de estructuras: Método clásico y matricial* (4.a ed., 2.ª parte). Pearson Educación.

Hurtado, J. E. (2015). *Análisis matricial de estructuras con MATLAB*. Editorial Alfaomega



# ALCORQUES INUNDABLES COMO SOLUCIÓN DE DRENAJE SOSTENIBLE EN ZONAS URBANAS: CASO DE ESTUDIO EN EL CAMPUS UNIVERSITARIO U.S.F.X.

Vargas, W.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Profesional independiente Ingeniero Civil Mención Hidráulica Sanitaria U.S.F.X. R.N.I. 55870-Estudiente de Maestría, Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Universidad de Valparaíso Chile, Centro de Estudios de Posgrado e Investigación, Sucre, Bolivia. E-mail: wilsonvargaslargo200293@gmail.com

Recibido: Aceptado: Publicado:

## RESUMEN

Este estudio presenta el diseño de alcorques inundables como alternativa de drenaje urbano sostenible en la ciudad de Sucre, Bolivia, con aplicación en el Campus Universitario de la Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca. El objetivo fue proponer una solución que gestione de manera eficiente las aguas pluviales, favoreciendo la infiltración, reduciendo la escorrentía superficial y contribuyendo al riego de áreas verdes. Para el dimensionamiento se calcularon volúmenes de calidad de agua a partir de variables hidrológicas clave (área tributaria, coeficiente de escorrentía y profundidad de lluvia), apoyados en curvas de intensidad-duración-frecuencia con un periodo de retorno de 2 años. El diseño consideró criterios técnicos sobre sustrato, drenaje y cobertura vegetal, además de aspectos constructivos relacionados con mantenimiento y adaptabilidad frente a diferentes pendientes. Los resultados indican que los alcorques inundables constituyen una solución funcional, sostenible y replicable, capaz de mejorar la gestión pluvial, mitigar riesgos de inundación y aportar beneficios ambientales adicionales, como la reducción de sedimentos y la mejora del microclima urbano. Este trabajo aporta evidencia técnica para impulsar la incorporación de alcorques inundables en la planificación de infraestructura verde y azul en ciudades bolivianas.

Palabras clave: drenaje urbano sostenible, alcorques inundables, infraestructura verde, gestión pluvial.

**Palabras clave:**

## ABSTRACT

This study presents the design of bioretention tree pits (alcorques inundables) as a sustainable urban drainage alternative in Sucre, Bolivia, applied to the Campus of Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca. The objective was to propose a solution to efficiently manage stormwater by enhancing infiltration, reducing surface runoff, and contributing to irrigation of green areas. The design was based on stormwater quality volume calculations using key hydrological variables (tributary area, runoff coefficient, and rainfall depth), supported by intensity-duration-frequency curves with a 2-year return period. Technical criteria related to substrate, drainage system, and selected vegetation cover were considered, as well as constructive aspects concerning maintenance and adaptability to different slopes. Results indicate that bioretention tree pits are a functional, sustainable, and replicable solution capable of improving stormwater management, mitigating local flood risks, and providing additional environmental benefits such as sediment reduction and urban microclimate improvement. This work provides technical evidence to promote the integration of bioretention tree pits into green and blue infrastructure planning in Bolivian cities.

**Key words:** sustainable urban drainage, bioretention tree pits, green infrastructure, stormwater management.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano acelerado en ciudades latinoamericanas ha generado un incremento de superficies impermeables que intensifica la escorrentía superficial, sobrecarga los sistemas de drenaje pluvial y favorece la ocurrencia de inundaciones locales. En la ciudad de Sucre, Bolivia, estas problemáticas son evidentes en sectores de alta concentración de edificaciones y pavimentos, como el Campus Universitario de la (U.S.F.X.), donde los sistemas convencionales muestran limitaciones frente a eventos de precipitación intensa.

Ante esta situación, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) constituyen una alternativa técnica y ambiental que busca reproducir los procesos naturales de infiltración y retención. Entre las distintas soluciones propuestas, los alcorques inundables destacan por combinar eficiencia hidráulica con beneficios ecológicos y paisajísticos, favoreciendo la infiltración, y el riego de áreas verdes.

A nivel internacional, su implementación ha demostrado eficacia en la reducción de caudales de escorrentía y en la mitigación de impactos derivados del cambio climático. No obstante, en el contexto local de Sucre, estas prácticas aún no han sido estudiadas ni aplicadas de manera sistemática.

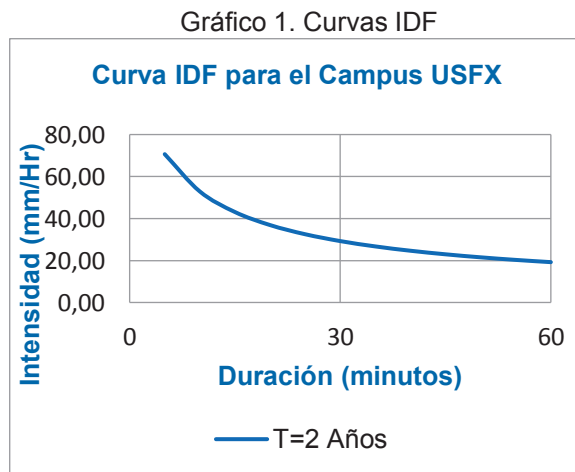
En este marco, el objetivo del presente estudio es diseñar y evaluar alcorques inundables en el Campus Universitario U.S.F.X. como estrategia de drenaje urbano sostenible, aportando evidencia técnica para su incorporación en la planificación de infraestructura verde y azul en la ciudad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El Campus Universitario U.S.F.X. se encuentra en el distrito 2 de la ciudad de Sucre tiene una superficie de 79.764,24 m<sup>2</sup>.

## MATERIALES

a) Datos hidrológicos: Curvas IDF locales con periodo de retorno de 2 años, coeficientes de escorrentía según tipo de superficie y área tributaria efectiva.



b) Sustrato: Capas de gravas, arenas y suelo filtrante, complementadas con geotextil para evitar colmatación.  
 c) Vegetación: Especies nativas y de bajo mantenimiento con capacidad de absorción y tolerancia a humedad.  
 d) Infraestructura de soporte: Bordes de confinamiento, rejillas superficiales y tuberías perforadas de drenaje.

## PROCESO DE DISEÑO HIDROLÓGICO

El dimensionamiento de los alcorques se realizó mediante el cálculo del Volumen de Calidad de Agua (VCA), empleando la siguiente fórmula:

$$V_c = h_p * A_d * C \quad (1)$$

Donde:

P = Profundidad de lluvia de diseño (mm)

C = Coeficiente de escorrentía

A = Área tributaria efectiva (m<sup>2</sup>)

Transformar la lluvia esperada para un periodo de retorno y una duración a la profundidad de la lluvia (h<sub>p</sub>).

$$h_p = 10.19 * (P_t^T) - 16.785 \quad (2)$$

**Donde:**

$h_p$ =Profundidad de lluvia (mm).

$P_t^T$ =Precipitación con un periodo de retorno y una duración (mm).

Tabla 1. Parámetros de forma y relieve

PARÁMETROS DE FORMA		
CARACTERÍSTICA		RESULTADO
Área	m <sup>2</sup>	79.764,24
Perímetro	m	1.325,34
Longitud de la Cuenca (L)	m	518,75
Factor de forma	-	0,30
Índice de compacidad	-	1,31
PARÁMETROS DE RELIEVE		
Pendiente media de la cuenca	m/m	0,10
Altura máxima	ms m	2.872,72
Altura mínima	ms m	2.844,62

**Ecuación de Bell:**

$$P_t^T = (0.21 \ln T + 0.52) (0.54t^{0.25} - 0.50) P_1^T \quad (3)$$

**Precipitación máxima para una hora y un periodo de retorno de diez años:**

$$P_1^{10} = \frac{P_{10}^{24}}{2.15} \quad (4)$$

**Donde:**

$P_t^T$  = Precipitación para diferente duración y periodo de retorno (mm).

$t$ =Duración (minutos).

$T$ =Periodo de retorno (años).

$P_1^{10}$ =Precipitación máxima para una hora y un periodo de retorno de diez años

$P_{10}^{24}$ =Precipitación máxima probabilística en 24 horas para un periodo de retorno de diez años (mm).

La estimación de la profundidad de lluvia se la realizo a partir de lluvias máximas en 24 horas.

Con los datos del portal web del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), identificando tres estaciones cercanas al área de estudio mencionadas a continuación, Estación Sucre SENAMHI.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Tabla 2. Precipitación para duración de una hora y periodo de retorno de 2 años.

T (años)	P (mm)
2	19,20

a partir de una precipitación 19.20 mm para un periodo de retorno de 2 años y una duración de 1 hora se procedió a calcular la profundidad de lluvia que se usara en el diseño de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.

**Profundidad de lluvia: 13,32mm.**

Tabla 4. Áreas de aporte facultad de Arquitectura

Área perm eable	Área imper meable	Área total
m <sup>2</sup> 275,0	m <sup>2</sup> 269,0	m <sup>2</sup> 544,0

Tabla 5. Áreas de aporte facultad Técnica

Área perm eable	Área imper meable	Área total
m <sup>2</sup> 147,0	m <sup>2</sup> 760,3	m <sup>2</sup> 907,3

**Volumen de calidad.**

Tabla 6. Alcorques inundables Facultad de Arquitectura 1

Tabla 6. Alcorques inundables Facultad de Arquitectura 1

Área perm.	Área imp.	Área total	C Perm.	C Imp.	hp	Vc
m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	-	-	mm	m <sup>3</sup>
275,0	<b>269,0</b>	<b>544,0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,85</b>	<b>13,32</b>	4,0

Tabla 7. Alcorques inundables Facultad de Arquitectura 2

Área Perm	Área Imp	Área Perm .2	C Perm	C Imp	C Perm 2	h p	Vc
m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	-	-	-	m m	m <sup>3</sup>
137,0	165,0	302,0	0,65,0	0,85	0,35	1,3	4,4

Tabla 8. Alcorques inundables Facultad Técnica

Área perm.	Área imp.	Área total	C Perm.	C Imp.	hp	Vc
m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	-	-	mm	m <sup>3</sup>
147,0	760,3	907,3	0,35	0,85	13,32	9,29

### Dimensionamiento del alcorque

con un ancho de 1,40m y un largo de 1,40m, con una profundidad de sustrato de tratamiento (dm) 0,80m y una profundidad final total de 1,5m, con la cual tiene la capacidad de tratar cada estructura un volumen de 1,67m<sup>3</sup>, que serán tratados “sin infiltración” y conducidos mediante el tren a un tanque de almacenamiento prefabricado en un máximo de 12 horas para su aprovechamiento en riego.

Tabla 9. Dimensionamiento del alcorque

Parámetro	Valor	Recomendación	
B del alcorque	1,40	m	-
L del alcorque	1,40	m	-
Área superficial (Asm)	1,96	m <sup>2</sup>	-
Profundidad (dm)	0,80	m	0,60<dm<Z1,00
Tiempo de vaciado del filtro (Td)	12	h s	Máximo de 12 horas
Permeabilidad del sustrato (k)	70	m m / h	Asumido como 70 mm/h
Porosidad efectiva del sustrato (mm)	50	%	Típicamente asumida como 40%
Parámetro	Valor	Recomendación	
Asm=As=Af	1,96	m <sup>2</sup>	
Máx. profundidad de encharcamiento (d)	0,25	m	0,15<d<0,30
Capa filtrante (dt)	0,05	m	Mín. 0,05 m
Capa de drenaje			
Diámetro de tubería perforada (Ds)	0,10	m	0.10<Ds <0,15m
Profundidad de la capa de drenaje sobre la tubería (dcg)	0,15	m	Mín. 0,15m
Porosidad efectiva de la capa de grava (ng)	50	%	Mín. 40%
Profundidad de la capa de drenaje bajo la tubería	0,15	m	Mín. 0,08m
Profundidad de la capa de drenaje (dc)	0,40	m	

Profundidad total hasta el fondo de la estructura	1,50	m	
Capa de drenaje			
Tasa de infiltración del suelo (f)	-	m/h	sin infiltración
Volumen infiltrado (Vinf)	-	m <sup>3</sup>	
Volumen filtrado (Vf)	1,67	m <sup>3</sup>	
Volumen de encharcamiento (Ven)	0,49	m <sup>3</sup>	
Volumen total a tratar (V)	1,67	m <sup>3</sup>	
Comprobación de diseño			
Área superficial mínima (As min)	1,72	m <sup>2</sup>	As min < Asm

Tabla 10. Sustrato

Componente	Contenido (%)
Arena	60-70
Compost	15-25
Tierra vegetal	10 --20
Contenido orgánico	0-20
pH	5.5 a 7.5
Porosidad	>40

### Sustrato

La capa filtrante que separa el sustrato y la capa de drenaje (dt), debe ser de un espesor mínimo de 0,05m conformada por partículas de tamaño menor a 12,5 mm. La capa de drenaje debe tener una profundidad total entre 0,33 y 0,38 m, distribuidas con mínimo 0,15m sobre la tubería de drenaje y mínimo 0,08m en la parte inferior más la tubería perforada de diámetro de 0,10 m a 0,15m, en polietileno o PVC perforada.

Los alcorques estarán conectados para conformar el tren de SUDS con tuberías de pvc de 0,10m o 4 pulgadas, dirigidos hacia un tanque de almacenamiento superficial.

Tabla 11. Cobertura vegetal asociada

Porte del árbol	Espacio vital
Bajo	1,0 m
Medio	2,0 m
Alto	3,0 m

Figura 1. Esquema Alcorque inundable

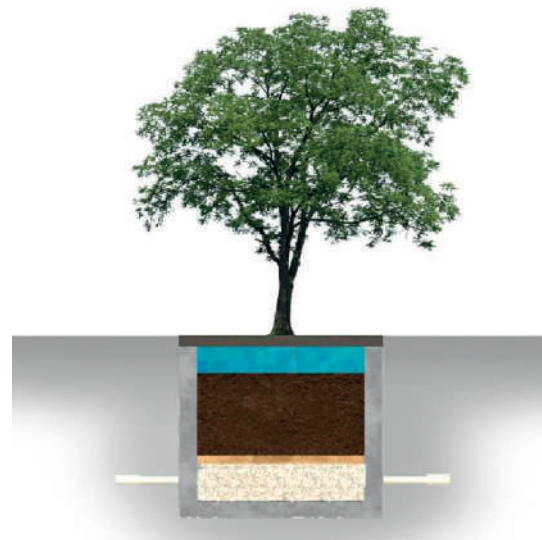
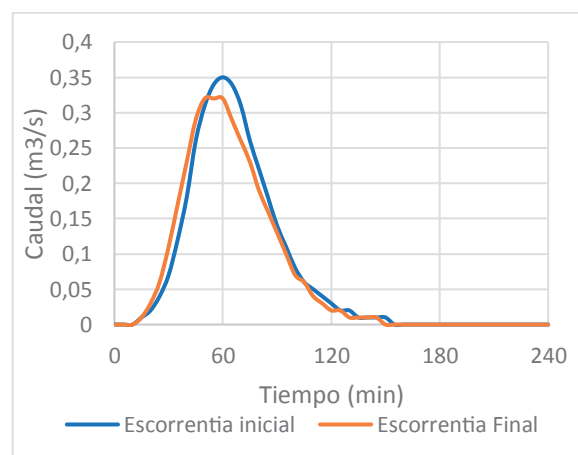


Figura 2. Hidrograma para el campus universitario USFX.



### CONCLUSIONES

-El diseño de alcorques inundables en el Campus Universitario U.S.F.X. demostró ser una solución funcional y sostenible para la gestión de aguas pluviales, reduciendo significativamente la escorrentía superficial y favoreciendo la infiltración.

-Los cálculos hidrológicos mostraron que la capacidad de captación varía según el área tributaria y el coeficiente de escorrentía, lo que resalta la importancia de una adecuada caracterización de superficies impermeables en el proceso de diseño.

-Además de su función hidráulica, los alcorques aportan beneficios ambientales adicionales como el aporte al riego de áreas verdes y la mejora del microclima urbano.

-La implementación de esta técnica resulta replicable en otras áreas urbanas de Sucre y de ciudades bolivianas, contribuyendo a fortalecer estrategias de infraestructura verde y azul orientadas a la resiliencia hídrica urbana.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CIIA. (2018). Manual de diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). Centro de Investigaciones de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia.

Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261–279.

<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>

NB 688. (2015). *Norma boliviana de drenaje urbano*. Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA).





# EFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN UN CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO TIPO PG 76-28 PMB 45/80-65, EN SUS PRINCIPALES PROPIEDADES

Rodríguez Mejía Abel Ernesto<sup>a</sup>, Cuellar Ortiz Gerson<sup>b</sup>, Salvador Ruiz Lizbeth Fanny<sup>c</sup>, Aceituno Chirari Elisa Mailen<sup>d</sup>

- a. Docente Investigador en el Área de Vías de Comunicación de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR,573, Sucre Bolivia. E-mail: abelrodriguez@gmail.com
- b. Ingeniero Investigador en el Área de Vías de Comunicación de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR,573, Sucre Bolivia. E-mail: gerson1998Ar@gmail.com
- c. Ingeniero Investigador en el Área de Vías de Comunicación de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR,573, Sucre Bolivia. E-mail: lizbethsalvador0504@gmail.com
- d. Estudiante Egresado en el Área de vías de comunicación de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR,573, Sucre Bolivia. E-mail: elisamailenaceituno@gmail.com

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar los efectos que produce la radiación solar en el cemento asfáltico (Tipo PG 76-28 PMB 45/80-65), mediante la determinación de diferencias en los resultados de los ensayos de penetración, Ductilidad, Viscosidad Brookfield y punto de ablandamiento.

El diseño de la investigación es experimental, logrando controlar y medir las variables que intervinieron en el estudio, como ser, tipo de asfalto, tiempo de exposición de las muestras en condiciones ambientales de la región, midiendo la radiación solar en el lugar donde expone directamente la muestra.

En los resultados se puede apreciar que la radiación por rayos del sol UV sí influye de manera notable en el envejecimiento del ligante asfáltico analizado. Esta influencia es más notoria durante los primeros meses de prueba, etapa en la que mezcla inicia el proceso de endurecimiento por envejecimiento, así mismo, se puede ver que la proyección a 10 meses de prueba, el ligante falla tanto en penetración como en ductilidad.

**Palabras clave:** Envejecimiento de asfalto, radiación solar y oxidación.

## ABSTRACT

The objective of this research study was to determine the effects of solar radiation on asphalt cement (Type PG 76-28 PMB 45/80-65) by identifying differences in the results of penetration, ductility, Brookfield viscosity, and softening point tests.

The research design is experimental, allowing control and measurement of the variables involved in the study, such as the type of asphalt, the exposure time of the samples under the region's environmental conditions, and measuring solar radiation at the location where the samples were directly exposed.

The results show that UV solar radiation significantly influences the aging of the analyzed asphalt binder. This influence is more pronounced during the first months of testing, a stage in which the mixture begins the hardening process due to aging. Furthermore, projections at 10 months of testing indicate that the binder fails both in penetration and ductility.

**Key words:** Aging asphalt, solar radiation and oxidation

## INTRODUCCIÓN

El asfalto es una mezcla compleja de hidrocarburos que, al modificarse con polímeros, mejora su desempeño estructural y térmico. Sin embargo, factores ambientales como la radiación solar provocan su envejecimiento, afectando sus propiedades reológicas. Este proceso, influido principalmente por la oxidación y la radiación UV, genera un aumento de la rigidez y pérdida de ductilidad del material. El estudio analiza dichos efectos en un cemento asfáltico modificado tipo PG 76-28 PMB 45/80-65, considerando las variaciones en sus propiedades físicas ante diferentes tiempos de exposición solar.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material empleado

El material de estudio corresponde a un cemento asfáltico modificado con polímero tipo PMB 45/80-65, clasificado según la especificación PG 76-28. Este ligante fue seleccionado por su amplio uso en pavimentos sometidos a altas temperaturas y tráfico intenso. Su fabricación se realizó bajo el sistema de gestión de calidad certificado por DQS Holding GmbH, conforme a la norma ISO 9001:2015 (Certificado N.º 31 100363 QM15).

El asfalto modificado con polímero se caracteriza por mejorar la adherencia, cohesión y elasticidad del ligante, reduciendo su susceptibilidad térmica y aumentando su capacidad viscoelástica frente a la variación de temperatura y carga.

### Diseño experimental

La investigación se desarrolló bajo un diseño experimental controlado, permitiendo medir el efecto de la radiación solar sobre las propiedades físicas del asfalto. Se analizaron cuatro parámetros fundamentales:

**Penetración (ASTM D5 / AASHTO T49-97)**

**Ductilidad (ASTM D113 / AASHTO T51-00)**

### Viscosidad Brookfield (ASTM D1439-03)

### Punto de ablandamiento (ASTM D36)

El objetivo fue determinar la variación de cada propiedad con respecto al **tiempo de exposición solar** (30, 60 y 90 días), comparándolas con los valores iniciales del ligante sin envejecer.

### Procedimiento experimental

Preparación de muestras. Se utilizaron recipientes de aluminio circulares (“en forma de pez”) para maximizar el área expuesta a la radiación ultravioleta (UV). Las muestras fueron calentadas a 100 °C hasta alcanzar una adecuada fluidez y posteriormente vertidas en los recipientes, manteniendo un espesor uniforme de 0,8–1,0 cm.

Condiciones de exposición. Las muestras fueron colocadas al aire libre bajo condiciones ambientales naturales en la ciudad de Sucre, Bolivia, durante un período de tres meses (95 días). La radiación solar y la temperatura ambiente fueron registradas continuamente mediante una estación meteorológica automática, ubicada junto a las muestras.

Medición de radiación solar Se cuantificó la irradiancia diaria ( $W/m^2$ ) y el índice UV a lo largo del día, obteniendo un promedio de  $600,51 W/m^2$ . Estas mediciones permitieron correlacionar los cambios físicos del asfalto con la intensidad de la radiación incidente.

### Ensayos de laboratorio

- **Penetración:** determinó la consistencia o dureza del ligante mediante la profundidad de una aguja normalizada (100 g, 25 °C, 5 s).
- **Ductilidad:** evaluó la deformación del asfalto antes de la rotura, elongando probetas a 25 °C con una velocidad de 5 cm/min.
- **Viscosidad Brookfield:** midió la resistencia al flujo mediante un viscosímetro rotacional a **135 °C**, temperatura típica de mezclado.
- **Punto de ablandamiento:** identificó la temperatura a la cual el ligante se ablanda lo suficiente para que una bola de acero descienda 25 mm.

Las muestras fueron preparadas en laboratorio; la Figura 1 muestra el estado del asfalto antes del envejecimiento. Luego de ser expuestas al sol, el material presentó un endurecimiento visible, como se observa en la Figura 2. Los resultados se analizaron comparando el comportamiento inicial y envejecido del ligante.

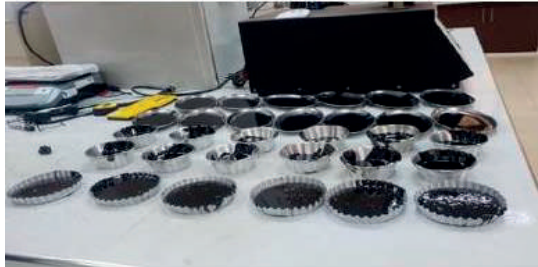


Fig. 1 Muestras de Asfalto inicial



Fig. 2 Muestra de Asfalto Envejecido

### PROCESO Y ANÁLISIS DE DATOS

El análisis de datos se realizó con base en los resultados obtenidos de los ensayos de penetración, ductilidad, viscosidad Brookfield y punto de ablandamiento, aplicados al cemento asfáltico modificado tipo PG 76-28 PMB 45/80-65, tras diferentes periodos de exposición a radiación solar en condiciones ambientales reales de la ciudad de Sucre.

La intensidad de la radiación solar fue registrada diariamente mediante una estación meteorológica instalada en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil. La relación entre el tiempo y la energía solar se representa en la Figura 3, donde se muestra una curva polinómica que evidencia la variabilidad de la radiación solar a lo largo del día.

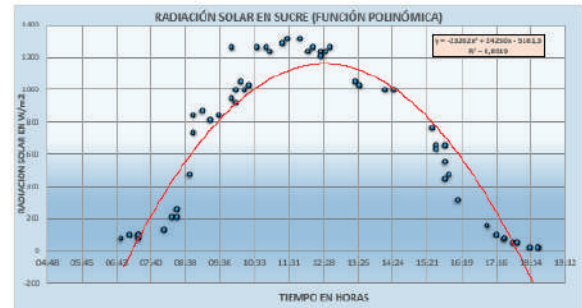


Figura 3. Distribución de energía solar

Las muestras de cemento asfáltico fueron preparadas con espesores entre 0,8 y 1 cm, colocadas en recipientes, y expuestas por 1, 2 y 3 meses. Posteriormente, se realizaron ensayos bajo normas ASTM y AASHTO, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1 como resumen general.

TIPO DE ASFALTO	TIEMPO DE EXPOSICIÓN	FECHA DE ENSAYO	ENSAYO DE PENETRACIÓN	ENSAYO DE DUCTILIDAD	ENSAYO DE REBLANDECIAMIENTO
PG 76-28 PMB 45/80-65	0 mes	9/10/2022	64	90	72.6
PG 76-28 PMB 45/80-65	1 mes	9/11/2022	58.22	64.67	72.83
PG 76-28 PMB 45/80-67	2 meses	9/12/2022	52.58	47.5	73.28
PG 76-28 PMB 45/80-68	3 meses	9/01/2023	41.33	24.18	73.7
PG 76-28 PMB 45/80-69	4 meses	9/02/2023	42.9888	24.388	73.6638
PG 76-28 PMB 45/80-70	5 meses	9/03/2023	35.6249	2.925	74.038
PG 76-28 PMB 45/80-71	6 meses	9/04/2023	28.261	-	74.4122
PG 76-28 PMB 45/80-72	7 meses	9/05/2023	20.8971	-	74.7864
PG 76-28 PMB 45/80-73	8 meses	9/06/2023	13.5332	-	75.1606
PG 76-28 PMB 45/80-74	9 meses	9/07/2023	6.1693	-	75.5348
PG 76-28 PMB 45/80-75	10 meses	9 de agosto del 2023	-	-	75.909

Tabla 1. Resumen de resultado de ensayos y ensayos proyectados

Los cambios en las propiedades del asfalto se analizaron a partir de comparaciones entre los valores iniciales y los envejecidos. La Figura 4 muestra el comportamiento decreciente de la penetración, indicando una mayor rigidez del ligante con el tiempo. Del mismo modo, la Figura 5 evidencia una pérdida progresiva de ductilidad, lo que confirma el deterioro de la elasticidad del material.

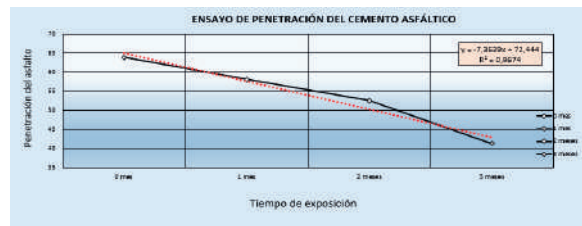


Figura 4. Ensayo de penetración del cemento asfáltico

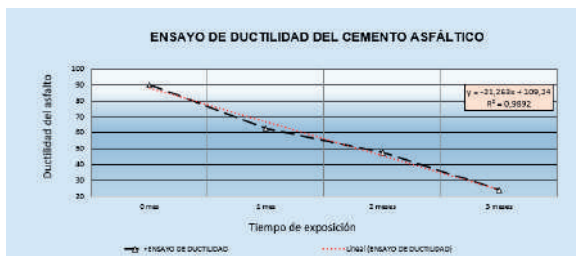


Figura 5. Ensayo de ductilidad del cemento asfáltico

En cuanto al punto de ablandamiento, representado en la Figura 6, se observa una leve tendencia creciente a lo largo de los meses, lo cual indica una ligera variación térmica del ligante, menos significativa en comparación con las demás propiedades evaluadas.

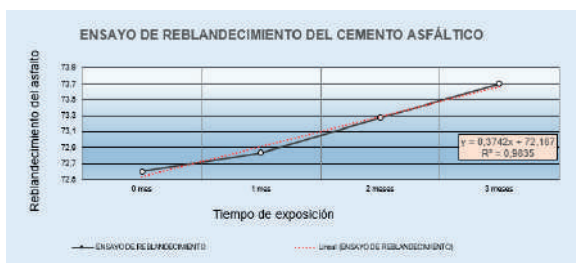


Figura 6. Ensayo de Reblandecimiento del cemento asfáltico

Finalmente, los datos fueron procesados en hojas de cálculo para generar proyecciones que permiten identificar el comportamiento del material a largo plazo. Se concluyó que el cemento asfáltico pierde sus propiedades viscoelásticas con rapidez durante los primeros meses de exposición solar, lo que compromete su desempeño en pavimentos flexibles.

## CONCLUSIONES

Se utilizó un método de diseño experimental para lograr analizar el efecto de la radiación solar en un cemento asfáltico modificado tipo PG 76-28 PMB 45/80-65, en sus principales propiedades.

De acuerdo a los valores obtenidos de los ensayos, se tiene seguridad que todas las muestras de cemento asfáltico, sin importar el espesor de la película experimentaron cambios

en sus propiedades reológicas evidenciando endurecimiento por envejecimiento.

Como se puede apreciar en el presente estudio con los resultados vistos en laboratorio, la radiación por rayos del sol UV, sí influye de manera notable en el envejecimiento del ligante tipo PG 76-28 PMB 45/80-65. Esta influencia es más notoria durante los primeros meses de prueba, etapa en la que la mezcla inicia el proceso de endurecimiento por envejecimiento, afectando directamente a la ductilidad del cemento asfáltico por rigidización del material, así mismo podemos ver que la proyección a 10 meses de prueba el ligante falla tanto de penetración como en ductilidad, siendo el motivo principal que el ensayo del ligante asfáltico por viscosidad aparente no logre ser interpretado por el equipo, dando valores no relacionados a los límites establecidos, demostrando que el cemento asfáltico ha perdido sus propiedades visco-elásticas.

En pavimentos flexibles a medida que pasa el tiempo los primeros milímetros de la carpeta de rodadura tienden a endurecerse más rápido que el resto del espesor de la capa, formando una capa que luego de cierto tiempo termina aislando el efecto fotoquímico del resto del espesor de la capa de rodadura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Argüelles, I. G. M. (2005). *EFFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL ENVEJECIMIENTO DE LI GANTES Y MEZCLAS ASFÁLTICAS*.
- Guerrero, W. M. C., & Pabón, S. B. C. (2020). Efecto del envejecimiento de mezclas asfálticas en el ciclo de vida del pavimento desde el aspecto técnico y ambiental. Revisión del estado de conocimiento. *Revista Vínculos*, 17(1), Art. 1. <https://doi.org/10.14483/2322939X.16227>
- Mogollón, J. M. R. (2021). *MONOGRAFÍA ENVEJECIMIENTO DE ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS: REVISIÓN TEÓRICA*.





# ANÁLISIS COMPARATIVO DE PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS POLIMÉRICAS PARA INSTALACIONES HIDROSANITARIAS MEDIANTE MODELOS EMPÍRICOS

Flores H.a, Maiz, M.a, Condori, E.<sup>b</sup>

- a. Docente de la Facultad de ingeniería Civil USFX. Destacamento 317, Ex campus REFISUR, 573, Sucre. Bolivia. [haydeeflo6@gmail.com](mailto:haydeeflo6@gmail.com)
- b. Estudiante de pregrado de la Facultad de ingeniería Civil USFX. Destacamento 317, Ex campus REFISUR, 573, Sucre. Bolivia. [michasljhosep@gmail.com](mailto:michasljhosep@gmail.com)
- c. Estudiante de pregrado de la Facultad de ingeniería Civil USFX. Destacamento 317, Ex campus REFISUR, 573, Sucre. Bolivia. [bcjune.2000@gmail.com](mailto:bcjune.2000@gmail.com)

Recibido: 01/10/2025    Aceptado:    Publicado:

## RESUMEN

---

Este estudio tuvo como objetivo realizar un análisis comparativo de las pérdidas de carga lineales y locales en tres diferentes tuberías poliméricas: policloruro de vinilo (PVC), polipropileno random (PPR) y polietileno reticulado (PEX). La investigación se basó en la aplicación de modelos empíricos, haciendo uso de las ecuaciones de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning. Los cálculos fueron complementados con simulaciones en EPANET que evaluó el comportamiento hidráulico dentro de un esquema representativo de red domiciliaria, permitiendo una cuantificación integral de las pérdidas. Los resultados evidenciaron diferencias en el desempeño de los materiales. Las tuberías de PEX demostraron ser las más eficientes, registrando las menores pérdidas de carga y un comportamiento más estable. Por otro lado, el PVC presentó las mayores pérdidas y una mayor variabilidad, mientras que el PPR mostró valores intermedios. En cuanto a las pérdidas locales, los accesorios tes fueron identificados como los más críticos. Se concluye que, bajo las condiciones evaluadas y considerando los tres modelos empíricos, la tubería de PEX se clasifica como la opción más eficiente para obtener menores pérdidas de carga en instalaciones hidrosanitarias. Los resultados proporcionan un antecedente cuantitativo valioso para apoyar la toma de decisiones de proyectistas.

---

**Palabras clave:** Pérdida de carga, tuberías poliméricas, Epanet, instalaciones hidrosanitarias.

## ABSTRACT

---

The objective of this study was to perform a comparative analysis of linear and local head losses in three different polymer pipes: polyvinyl chloride (PVC), random polypropylene (PPR), and cross-linked polyethylene (PEX). The research was based on the application of empirical models, using the Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, and Manning equations. The calculations were complemented by simulations in EPANET, which evaluated the hydraulic behavior within a representative residential network scheme, allowing for a comprehensive quantification of the losses. The results showed differences in the performance of the materials. PEX pipes proved to be the most efficient, recording the lowest head losses and more stable behavior. On the other hand, PVC showed the highest losses and greater variability, while PPR showed intermediate values. In terms of local losses, tee fittings were identified as the most critical. It is concluded that, under the conditions evaluated and considering the three empirical models, PEX piping is classified as the most efficient option for obtaining lower pressure losses in water and sanitation installations. The results provide valuable quantitative background information to support designers' decision-making.

---

**Keywords:** Pressure drops, polymer pipes, Epanet, Plumbing installations.

## INTRODUCCIÓN

Las tuberías poliméricas como policloruro de vinilo (PVC), polipropileno random (PPR) y polietileno reticulado (PEX) son ampliamente utilizadas en instalaciones hidrosanitarias dentro de nuestro entorno debido a su resistencia a la corrosión, peso ligero y facilidad de instalación (Simina et al., 2023). Sin embargo, resulta esencial cuantificar las pérdidas de energía de primer y segundo orden generadas por los materiales en sistemas de agua potable para viviendas y edificaciones.

La estimación de las pérdidas de carga por fricción en tuberías constituye un aspecto fundamental para las aplicaciones de ingeniería, particularmente en el diseño hidráulico y el análisis de redes de distribución de agua, porque se necesita garantizar la eficiencia y funcionalidad de los sistemas. (Castillo et al., 2018)

El software EPANET integra tres modelos empíricos ampliamente reconocidos para el cálculo de pérdidas por fricción en tuberías: Hazen-Williams (HW), Darcy-Weisbach (DW) y Chezy-Manning (CM) (Vegas et al., 2018). Si bien presentan variaciones en los coeficientes de rugosidad y están sujetos a normativas nacionales, su aplicación en instalaciones hidrosanitarias requiere considerar los rangos de validez y limitaciones específicas de cada ecuación para unos resultados precisos.

Para las pérdidas locales, el método de longitudes equivalentes evalúa las pérdidas localizadas en accesorios de sistemas de agua a presión. Aunque los coeficientes de pérdidas locales pueden variar según el material, esta metodología incorpora las longitudes equivalentes a la longitud real de la tubería, facilitando el cálculo de pérdidas totales mediante su tratamiento como pérdidas exclusivas por fricción. (Guaycochea, 1995)

La ecuación de Darcy Weisbach, que relaciona longitud, velocidad y material propuesta por

Julius Weisbach (1806-1871) es la siguiente. (Brown, 2002)

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

hf: Pérdida por fricción (m)  
 f: coeficiente de fricción, adimensional  
 L: Longitud del tramo de tubería (m)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)  
 V: Velocidad del flujo  
 g: Gravedad de la tierra (9.81m/s<sup>2</sup>)

Osborne Reynolds (1842-1912) estableció mediante experimentos el número adimensional que lleva su nombre para clasificar los regímenes de flujo.

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (2)$$

Re: Número de Reynolds (adimensional)  
 V: Velocidad del flujo (m/s)  
 D: Diámetro del conducto (m)  
 ν: Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)  
 Consideraremos un flujo turbulento

Tipos de flujos:  
 Flujo laminar: Re<2300  
 Flujo de transición: 2300<Re<4000  
 Flujo turbulento: Re>4000

White (1939) estableció que el factor de fricción en tuberías comerciales en la región de transición puede modelarse mediante la ecuación (3) considerando régimen turbulento. (Brown, 2002)

$$f = \frac{0.25}{[\log(\frac{\epsilon}{3.71 * D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}})]^2} \quad (3)$$

f: coeficiente de fricción, adimensional  
 ε: Rugosidad absoluta del material (mm)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)  
 Re: Número de Reynolds (adimensional)

Se emplearán los siguientes valores de rugosidad absoluta (ε) en mm para cada

material, según fichas técnicas de tuberías poliméricas de la empresa Tigre:

PVC	PPR	PEX
0.0015	0.003	0.004

**Tabla 1:** Rugosidad absoluta para Tuberías polimérica.

La ecuación de Hazen-Williams permite calcular pérdidas de energía por fricción en tuberías mediante un coeficiente empírico  $C_H$ , que depende de la rugosidad y el material de la tubería, ofreciendo una solución práctica, pero con limitaciones en precisión frente a modelos teóricos. (Gavilánez, 2020)

$$h_f = \frac{10.67 * L * Q^{1.85}}{D^{4.87} * C^{1.85}} \quad (4)$$

$h_f$ : Pérdida por fricción (m)  
 $C_{HW}$ : coeficiente de rugosidad (adimensional)  
 L: Longitud del tramo de tubería (m)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)  
 Q: Caudal o demanda ( $m^3/Sg$ ) (Guaycochea, 1995)

Coefficientes de rugosidad de Hazen Williams ( $C_{HW}$ ), según fichas técnicas de tuberías poliméricas de la empresa Tigre:

PVC	PPR	PEX
140-150	150	130-140

**Tabla 2:** coeficiente de rugosidad, (HW).

La ecuación de Manning, propuesta en 1890 para canales abiertos, se adaptó para calcular pérdidas de carga considerando la pendiente de la línea de energía ( $h_f/L$ ) en tuberías lisas de polietileno con diámetros y gastos reducidos, considerando régimen turbulento.

$$h_f = \frac{10.2936 * n^2 * L * Q^2}{D^{16/3}} \quad (5)$$

$h_f$ : Pérdida por fricción (m)  
 n: coeficiente de rugosidad (adimensional)  
 L: Longitud del tramo de tubería (m)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)  
 Q: Caudal o demanda ( $m^3/Sg$ )

PVC	PPR	PEX
0.010	0.008	0.007-0.009

**Tabla 3:** Coeficiente de rugosidad n, (CH).

Para determinar las pérdidas locales en accesorios de tuberías, se utiliza una ecuación basada exclusivamente en la geometría del elemento.

$$h_L = K * \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

K: Constante de perdida local (adimensional)  
 V: Velocidad del flujo (m/s)  
 g: Gravedad de la tierra ( $9.81m/s^2$ )

A partir de la igualdad  $h_L=h_f$  entre las ecuaciones (1), (4) y (5), se derivaron las longitudes equivalentes para diferentes accesorios, considerando su geometría como el material de la tubería (Guaycochea, 1995).

Para Darcy Weisbach:

$$L_e = \frac{9.1 * k * D^{1.25}}{\left(\frac{\varepsilon + 0.034}{1000}\right)^{0.25}} \quad (7)$$

$L_e$ : Longitud equivalente por accesorio (m)  
 K: Constante de perdidas locales  
 $\varepsilon$ : Rugosidad absoluta del material (mm)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)

Para Hazen Williams:

$$L_e = 0.0083 * k * C^{1.85} * D^{1.15} \quad (8)$$

$L_e$ : Longitud equivalente por accesorio (m)  
 K: Constante de perdidas locales

$C_{HW}$ : coeficiente de rugosidad (adimensional)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)

Para Manning:

$$L_e = \frac{0.008027 * K * D^3}{n^2} \quad (9)$$

$L_e$ : Longitud equivalente por accesorio (m)

K: Constante de pérdidas locales  
 n: coeficiente de rugosidad (adimensional)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)

Con estos valores se incorporará la longitud equivalente a la longitud real.

$$L = L_R + L_e \quad (10)$$

L: Longitud total (m)  
 $L_R$ : Longitud real (m)  
 $L_e$ : Longitud equivalente (m)

**MATERIALES Y METODOS**

El caso de estudio esta especificado en evaluar las pérdidas de carga primarias y secundarias en tuberías poliméricas (PVC, PPR y PEX) mediante la aplicación de tres modelos empíricos; Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning. El análisis se implementó en un esquema representativo de red hidrosanitaria, utilizando el software EPANET para simular integralmente el comportamiento hidráulico del sistema bajo condiciones operativas reales.

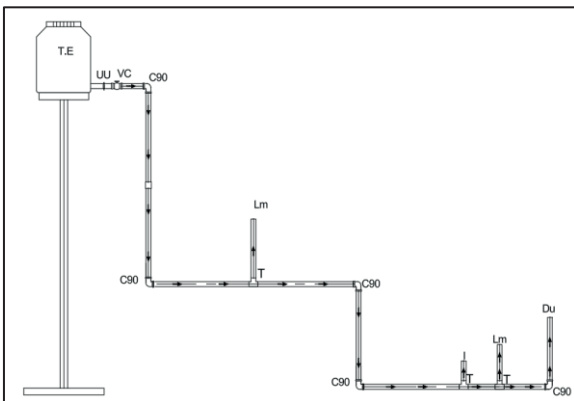


Fig. 1 Esquema de red

Para estimar los caudales usamos el método de Hunter teniendo 3 tipos de artefactos sanitarios más típicos (Inodoro, lava manos y ducha).

Art. Sanitario	Simbología	U. G agua fría
Inodoro	I	2.5
Lava manos	Lm	1
Ducha	Du	1.5

Tabla 4. Unidades de gasto por artefacto sanitario, método Hunter, (RENISDA, 2011). Se utilizarán las constantes de pérdida local para los accesorios en el esquema de la red hidrosanitaria, en base a fichas técnicas de los catálogos de la empresa Tigre.





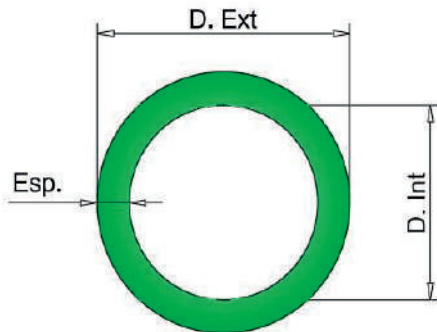
Accesorio	K(PVC)	K(PPR)	K(PEX)
 Codo de 90°	0.4	1.5	0.37
 Tee, Q divergente	1.8	1.8	0.1
 Válvula compuerta	0.2	0.2	0.2
 Unión Universal	0.3	0.25	1

Tabla 5. Constantes de pérdidas locales.

Entre los diámetros comerciales se emplearon de 1/2" y 1" con la variación de los espesores a partir del tipo de tubería.



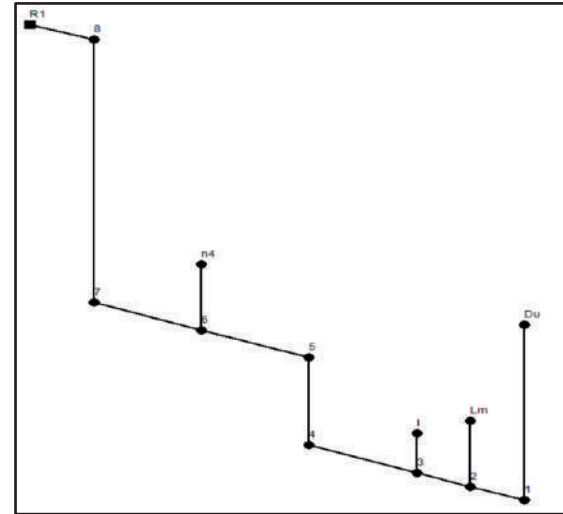
**Fig.2** Diámetro interior y exterior de tuberías poliméricas

D (in)	PVC (mm)	PPR (mm)	PEX (mm)
1/2in	15	16.2	16
1in	20	20.4	20

**Tabla 6.** Diámetro interior de tuberías poliméricas.

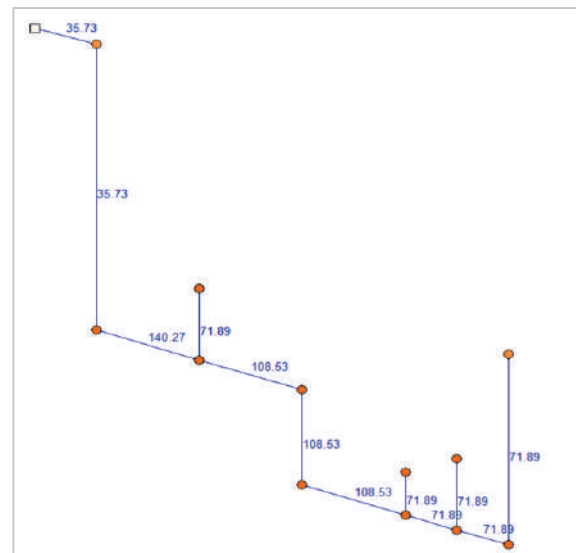
### MODELO NUMÉRICO

Se desarrolló un modelo numérico utilizando el software EPANET, considerando que la presión mínima en el artefacto más desfavorable debe ser de 2 m.c.a. Para ello, se modeló todo el esquema hidrosanitario aplicando las 3 ecuaciones, teniendo en cuenta las longitudes equivalentes, los diámetros comerciales y la rugosidad específica de cada material.



**Fig.3** Modelo numérico Epanet.

Para el análisis del primer modelo de tuberías PVC se obtuvieron los siguientes resultados donde la pérdida de carga se expresa de una pérdida unitaria m/km.



**Fig.4** Pérdidas de energía unitaria, tubería PVC, (Darcy-Weisbach).

El software EPANET proporciona las pérdidas unitarias, las cuales se emplearon para calcular la pérdida de carga total por tramo mediante la siguiente ecuación:

$$H_f = P_u * L \quad (11)$$

$P_u$ : Pérdida unitaria (m/km)

$L$ : Longitud de cada tramo (km)

Se determinan las pérdidas de energía totales para los tres materiales de tubería (PVC, PPR y PEX) mediante la aplicación comparativa de las ecuaciones de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning.

**RESULTADOS Y DISCUSION**

**Calculo longitudes equivalentes**

Se determinaron las longitudes equivalentes para cuatro tipos de accesorios en cada material polimérico mediante la aplicación de las ecuaciones (7), (8) y (9).

Resultados:

Accesorio	Le (PVC)	Le (PPR)	Le (PEX)
Codo de 90	0.25	0.67	0.24
Tee	1.11	1.21	0.07
Válvula compuerta	0.12	0.14	0.13
Unión universal	0.185	0.17	0.66

**Tabla 7.** Longitudes equivalentes (Darcy)

Accesorio	Le (PVC)	Le (PPR)	Le (PEX)
Codo de 90	0.28	1.14	0.22
Tee	1.27	1.36	0.06
Válvula compuerta	0.14	0.15	0.12
Unión universal	0.21	0.19	0.58

**Tabla 8.** Longitudes equivalentes (Hazen)

Accesorio	Le (PVC)	Le (PPR)	Le (PEX)
-----------	----------	----------	----------

Codo de 90	0.12	0.46	0.17
Tee	0.53	0.84	0.05
Válvula compuerta	0.06	0.09	0.09
Unión universal	0.09	0.12	0.46

**Tabla 9.** Longitudes equivalentes (Manning)

El análisis de las Tablas 7, 8 y 9, correspondientes a las longitudes equivalentes calculadas mediante Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning, revela que el valor máximo se presenta en las tes de PPR, seguidas por las de PVC. Este comportamiento puede atribuirse al efecto de divergencia del flujo en estos accesorios, donde la derivación lateral comprime el flujo principal, generando un incremento abrupto en la velocidad aguas abajo y consecuentemente mayores pérdidas de energía (Liu et al., 2021). Los resultados son consistentes en los tres modelos empleados, confirmando la criticidad de estos elementos en el diseño hidráulico.

**Cálculo de pérdidas totales utilizando Darcy-Weisbach**

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	f	H <sub>f</sub> (m)
R1_8	0.94	35.73	0.029	0.034
8_7	5.30	35.73	0.029	0.189
7_6	1	140.27	0.027	0.140
6_5	1	108.53	0.028	0.109
5_4	1.25	108.53	0.028	0.136
4_3	2.36	108.53	0.028	0.256
3_2	1.61	71.89	0.029	0.116
2_1	0.5	71.89	0.029	0.036
1_Du	2.25	71.23	0.029	0.160

**Tabla 10.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PVC, (Darcy).

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	f	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.9	32.7	0.029	0.029
8_7	5.34	32.7	0.029	0.175
7_6	1	98	0.027	0.098
6_5	1	75.8	0.028	0.076
5_4	1.27	75.8	0.028	0.096
4_3	2.48	75.8	0.028	0.188
3_2	1.71	50.19	0.03	0.086
2_1	0.5	50.19	0.03	0.025
1_Du	2.27	47.35	0.03	0.107

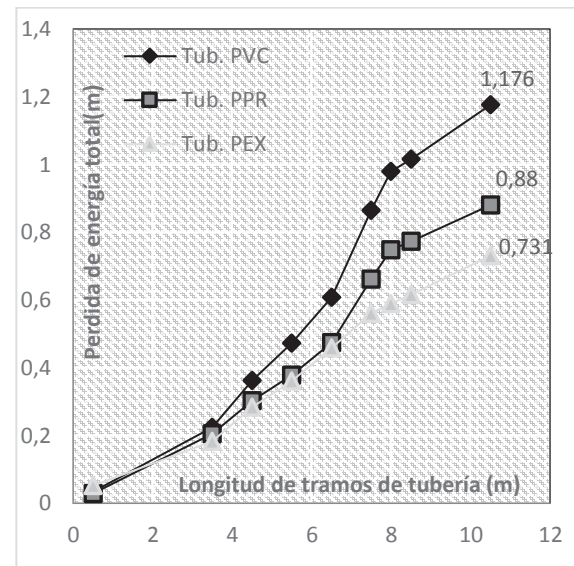
**Tabla 11.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PPR, (Darcy).

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	f	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	1.5	34.84	0.028	0.052
8_7	3.73	34.84	0.028	0.130
7_6	1	101.18	0.027	0.101
6_5	1	78.14	0.027	0.078
5_4	1.24	78.14	0.027	0.097
4_3	1.31	78.14	0.027	0.102
3_2	0.57	51.62	0.029	0.029
2_1	0.5	51.62	0.029	0.026
1_Du	2.24	51.62	0.029	0.116

**Tabla 12.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PEX, (Darcy).

Las Tablas 10, 11 y 12 presentan los resultados de las simulaciones en EPANET utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach para los sistemas de PVC, PPR y PEX respectivamente. Cada tabla incluye: la longitud total del tramo (que incorpora las longitudes equivalentes de los

accesorios), la pérdida unitaria, el factor de fricción y la pérdida de energía total calculada.



**Fig.5** pérdidas de carga totales para los 3 materiales usando Darcy-Weisbach.

La figura 5 muestra las pérdidas acumuladas calculadas en el sistema de red con Darcy-Weisbach. El PVC registró la mayor pérdida (1.176 m) en el punto crítico, mientras PPR y PEX presentaron valores menores de 0.88m y 0.73 respectivamente.

**Cálculo de pérdidas totales utilizando Hazen-Williams**

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	C	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.99	31.6	150	0.031
8_7	6.55	31.61	150	0.207
7_6	1	128.33	150	0.128
6_5	1	97.82	150	0.098
5_4	2.28	97.82	150	0.223
4_3	2.55	97.82	150	0.249
3_2	1.77	63.14	150	0.112
2_1	0.5	63.14	150	0.032

1_Du	2.28	63.14	150	0.144
------	------	-------	-----	-------

**Tabla 13.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PVC, (Hazen).

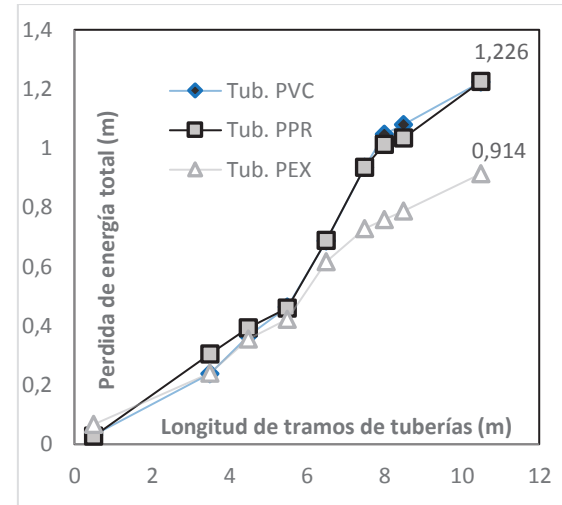
Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	C	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.94	28.7	150	0.027
8_7	9.68	28.7	150	0.278
7_6	1	88.21	150	0.088
6_5	1	67.24	150	0.067
5_4	3.41	67.24	150	0.229
4_3	3.67	67.24	150	0.247
3_2	1.77	43.4	150	0.077
2_1	0.5	43.4	150	0.022
1_Du	4.41	43.4	150	0.191

**Tabla 14.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PPR, (Hazen).

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	C	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	1.78	37.41	130	0.067
8_7	4.63	37.41	130	0.173
7_6	1	114.98	130	0.115
6_5	1	87.64	130	0.067
5_4	2.22	87.64	130	0.195
4_3	1.27	87.64	130	0.111
3_2	0.56	56.57	130	0.032
2_1	0.5	56.57	130	0.028
1_Du	2.22	56.57	130	0.126

**Tabla 15.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PEX, (Hazen).

Las Tablas 13, 14 y 15 presentan los resultados de las simulaciones realizadas en EPANET mediante la aplicación de la ecuación de Hazen Williams para los sistemas de tuberías de PVC, PPR y PEX, respectivamente.



**Fig.6** pérdidas de carga totales para los 3 materiales usando Hazen-Williams.

El análisis mediante la ecuación de Hazen-Williams, considerando los coeficientes de rugosidad específicos de cada material, determinó que las mayores pérdidas de energía en el punto más desfavorable corresponden a PVC y PPR, registrando valores coincidentes de 2.226 m. En contraste, el sistema con tubería PEX presentó la menor pérdida de energía, con un valor de 0.914 m.

**Cálculo de pérdidas totales utilizando Manning**

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	n	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.59	56.96	0.01	0.034
8_7	5.13	56.96	0.01	0.292
7_6	1	264.18	0.01	0.264
6_5	1	197.04	0.01	0.197
5_4	2.12	197.04	0.01	0.418
4_3	1.65	197.04	0.01	0.325

3_2	1.03	122.81	0.01	0.126
2_1	0.5	122.81	0.01	0.061
1_Du	2.12	122.81	0.01	0.260

**Tabla 16.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PVC, (Manning).

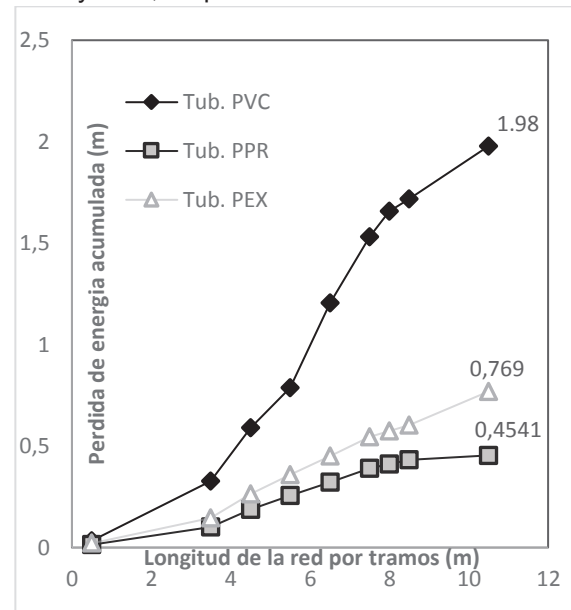
Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	n	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.64	32.800	0.008	0.021
8_7	8	32.800	0.008	0.262
7_6	1	112.160	0.008	0.112
6_5	1	83.660	0.008	0.084
5_4	2.93	83.660	0.008	0.245
4_3	2.76	83.660	0.008	0.231
3_2	1.34	52.140	0.008	0.070
2_1	0.5	52.140	0.008	0.026
1_Du	2.93	52.140	0.008	0.153

**Tabla 17.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PPR, (Manning).

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	n	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.64	36.46	0.008	0.023
8_7	4.57	36.46	0.008	0.016
7_6	1	119.84	0.008	0.120
6_5	1	89.39	0.008	0.089
5_4	2.17	89.39	0.008	0.194
4_3	1.22	89.39	0.008	0.109
3_2	0.55	55.71	0.008	0.031
2_1	0.5	55.71	0.008	0.028
1_Du	2.17	55.71	0.008	0.121

**Tabla 18.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PEX, (Manning).

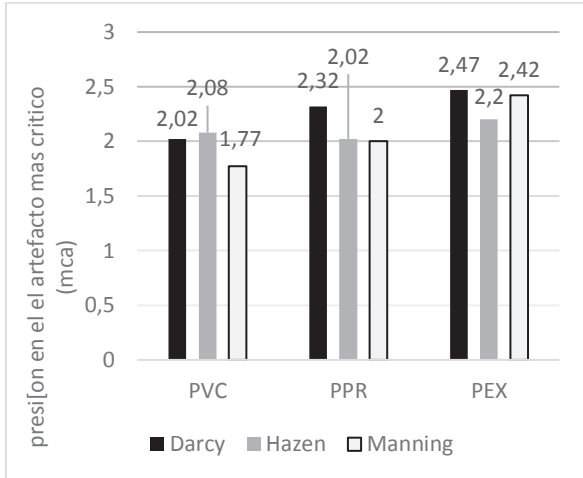
Las Tablas 16, 17 y 18 recopilan los resultados de las simulaciones numéricas realizadas en EPANET aplicando la ecuación de Manning para modelar el comportamiento hidráulico de los sistemas conformados por tuberías de PVC, PPR y PEX, respectivamente.



**Fig.7** pérdidas de carga totales para los 3 materiales usando Manning.

La Figura 7 compara las pérdidas de carga totales calculadas con la ecuación de Manning para los tres materiales. Los resultados muestran que el PVC presenta la mayor pérdida (1.98 m), seguido del PPR (0.769 m), mientras que el PEX registra el valor más bajo (0.45 m).

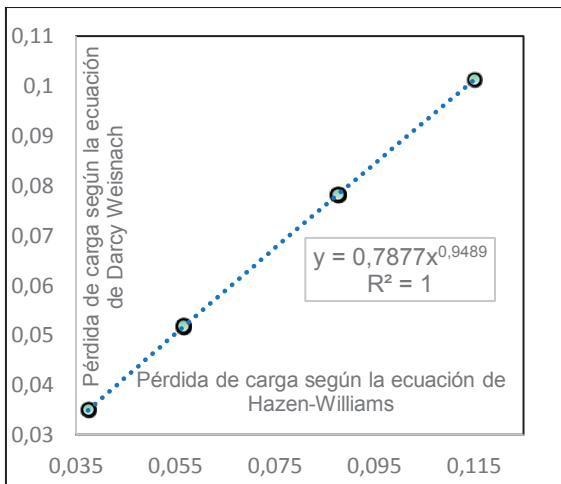
### Análisis de presiones



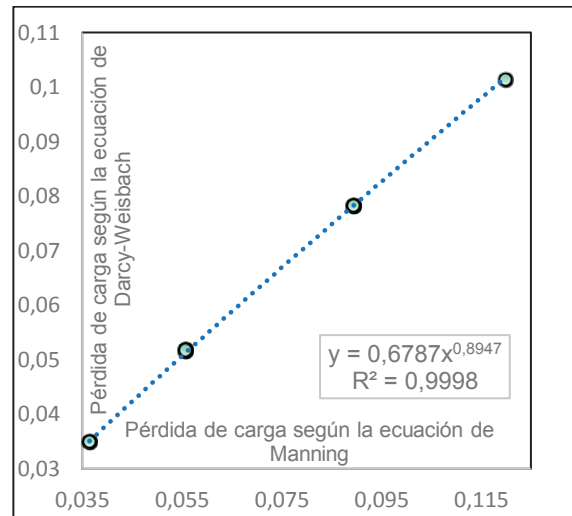
**Fig.8** La presión obtenida en el artefacto más desfavorable

El análisis de presión en el punto crítico (una ducha) del sistema hidrosanitario revela que, para las tres ecuaciones empíricas, la tubería de polietileno reticulado (PEX) registró las mayores presiones: 2.47 mca con Darcy-Weisbach, 2.2 mca con Hazen-Williams y 2.42 mca con Manning. Estos resultados confirman el superior desempeño hidráulico del PEX en condiciones operativas reales.

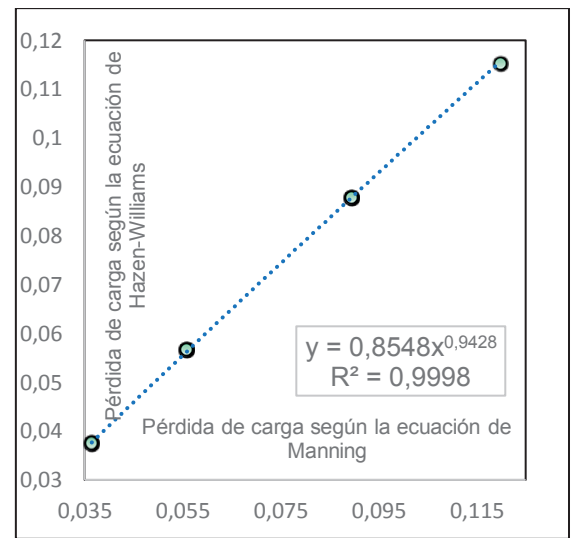
Se cuantificó el grado de correlación entre las tres ecuaciones empíricas aplicadas al polietileno reticulado (PEX) mediante análisis estadístico de las pérdidas de carga por tramo.



**Fig.9** La pérdida de carga expresada en metros de longitud de tubería a lo largo de ambos ejes.



**Fig.10** La pérdida de carga expresada en metros de longitud de tubería a lo largo de ambos ejes.



**Fig.11** La pérdida de carga expresada en metros de longitud de tubería a lo largo de ambos ejes.

A partir de las gráficas 9,10 y 11, donde se obtuvo las siguientes correlaciones:

- Darcy Welsbach vs. Hazen Williams: R=1
- Darcy Welsbach vs. Manning: R=0.9998
- Hazen Williams vs. Manning: R=0.9998

Los coeficientes de correlación ( $R > 0.9$ ) evidencian una alta consistencia entre los modelos empíricos al evaluar pérdidas de carga en tuberías de polietileno reticulado (PEX), validando la confiabilidad de los resultados.

La tendencia de que el material influye en las pérdidas de carga se explica por las variaciones en la rugosidad interna de cada material que condiciona la fricción y por ende la disipación de energía.

El comportamiento de la presión en el punto más desfavorable reafirma que el PEX tiene valores óptimos que indica una mejor estabilidad del sistema y una menor pérdida en condiciones de uso real.

## CONCLUSIONES

A partir del análisis comparativo y la modelación numérica en EPANET de las pérdidas de carga en tuberías poliméricas, se han extraído las siguientes conclusiones fundamentales:

Se determinó cuantitativamente que la tubería de Policloruro de Vinilo (PVC) presenta las mayores pérdidas de carga totales en el sistema, que son atribuibles tanto a la fricción lineal como a las pérdidas locales en accesorios. Este material exhibió una menor eficiencia hidráulica entre las opciones evaluadas.

La tubería de Polietileno Reticulado (PEX) se posicionó como la opción más eficiente desde el punto de vista hidráulico, registrando de manera consistente las menores pérdidas de carga en los tres modelos empíricos utilizados. Su rendimiento superior la posiciona como la alternativa óptima para la minimización de pérdidas energéticas en instalaciones hidrosanitarias.

El Polipropileno Random (PPR) mostró un comportamiento intermedio, con valores de pérdida de carga que se sitúan consistentemente entre los del PVC y el PEX.

Los porcentajes promedio de diferencia en pérdidas de energía, considerando los tres modelos empíricos, indican que el PEX presenta una reducción del 46.7% respecto al PVC y del 27.8% si se compara con el PPR, dando a notar su eficiencia hidráulica superior.

El análisis de pérdidas locales identificó a los accesorios tipo "Te" con flujo divergente como los componentes que generan la mayor pérdida de energía singular en el sistema para los tres materiales. Este hallazgo subraya su importancia como puntos críticos en el diseño de redes.

Si bien los tres modelos de cálculo (Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning) dieron como resultado magnitudes de pérdida diferentes, fueron consistentes en identificar la misma jerarquía de eficiencia entre los materiales, validando así las conclusiones sobre el rendimiento relativo de las tuberías.

Esta concordancia entre métodos coincide con lo reportado por *Rehan (2019)*, quien también verificó la consistencia de las ecuaciones en el análisis de sistemas de tuberías.

## BIBLIOGRAFIA

Brown, G. O. (2002). The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance (p. 43).

Castillo Calderón, J., Solórzano Castillo, B., & Moreno Moreno, J. (2018). Diseño de una red neuronal para la predicción del coeficiente de pérdidas primarias en régimen de flujo turbulento. *Ingenium. Revista de Ciencia y Tecnología*. (20), <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16390>

Gavilánez-Luna, F. (2020). Incidencia de la presión sobre el coeficiente de rugosidad C de Hazen-Williams. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12. <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/2223>

Guaycochea, D. (1995). *Fórmulas sencillas para el cálculo de longitudes equivalentes*. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

Liu, T., Li, S., Jiang, C., Zhang, X., & Tan, Z. (2023). Local resistance characteristics of T-type tee based on chamfering treatment. *Sustainability*, 5(19), 14611. <https://doi.org/10.3390/su151914611>

Rehan, J. (2019). Frictional head loss relation between Hazen-Williams.

Stefan, S., Bosomoiu, M., & Teodorescu, G. (2023). The behavior of polymeric pipes in drinking water. *Polymers*, 15(19), 3872. <https://doi.org/10.3390/polym15193872>

Vegas Niño, O. T., & Martínez Alzamora, F. (2018). Equivalencia de coeficientes de rugosidad. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18393.98401/1>





# EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE UN REFUERZO HÍBRIDO ACERO-BAMBÚ PARA OPTIMIZAR CUANTÍAS EN ELEMENTOS A FLEXIÓN

Guaman E.<sup>a</sup>, Palaguerra, D.<sup>b</sup>, Maiz, M.<sup>c</sup>, Albornoz, L.<sup>d</sup>, Condori, E.<sup>e</sup>

- a. Docente titular de la Facultad de Ingeniería Civil USFX. Destacamento 317, Ex campus REFISUR, 573, Sucre. Bolivia. [guaman.eduardo@usfx.bo](mailto:guaman.eduardo@usfx.bo)
- b. Estudiante de pregrado de la Facultad de Ingeniería Civil USFX. Destacamento 317, Ex campus REFISUR, 573, Sucre. Bolivia. [michasljhosep@gmail.com](mailto:michasljhosep@gmail.com)
- c. Estudiante de pregrado de la Facultad de Ingeniería Civil USFX. Destacamento 317, Ex campus REFISUR, 573, Sucre. Bolivia. [Bcjune.2000@gmail.com](mailto:Bcjune.2000@gmail.com)
- d. Estudiante de pregrado de la Facultad de Ingeniería Civil USFX. Destacamento 317, Ex campus REFISUR, 573, Sucre. Bolivia. [Albornozlimber76@gmail.com](mailto:Albornozlimber76@gmail.com)
- e. Estudiante de pregrado de la Facultad de Ingeniería Civil USFX. Destacamento 317, Ex campus REFISUR, 573, Sucre. Bolivia. [Bcjune.2000@gmail.com](mailto:Bcjune.2000@gmail.com)

Recibido: 01/10/2025

Aceptado:

Publicado

## RESUMEN

El presente estudio analizó la viabilidad de reducir el contenido de acero en vigas de hormigón armado mediante la incorporación de bambú de la especie "Tacuara", procedente de Cochabamba (Bolivia), como refuerzo complementario. La metodología incluyó ensayos de flexión en vigas a escala, comparando el desempeño de un refuerzo mixto de acero longitudinal combinado con barras de Tacuara frente a una configuración tradicional. Adicionalmente, se caracterizó la resistencia del hormigón mediante ensayos de compresión uniaxial según la norma ASTM C39, y se evaluó la adherencia en la interfaz hormigón-bambú mediante probetas específicas. Los resultados obtenidos demuestran que el bambú Tacuara es capaz de absorber esfuerzos de tracción de manera eficiente, lo que permitió reducir la cuantía de acero en un 10.08% sin afectar significativamente la capacidad estructural de la viga. Los ensayos de compresión respaldaron la viabilidad del sistema, al registrar resistencias superiores a 21 MPa en el hormigón, valor compatible con aplicaciones estructurales. En conclusión, el uso de Tacuara como refuerzo complementario se presenta como una alternativa sostenible y técnicamente viable en la región.

**Palabras clave:** Reducción de cuantía, Bambú tacuara, Adherencia bambú-hormigón, comportamiento híbrido.

## ABSTRACT

This study analyzed the feasibility of reducing the steel content in reinforced concrete beams by incorporating Tacuara bamboo from Cochabamba, Bolivia, as complementary reinforcement. The methodology included flexural testing on scaled beams, comparing the performance of a composite reinforcement of longitudinal steel with Tacuara bars versus a traditional configuration. Additionally, the concrete strength was characterized using uniaxial compression tests according to ASTM C39, and the adhesion at the concrete-bamboo interface was evaluated using specific specimens. The results demonstrate that Tacuara bamboo is capable of efficiently absorbing tensile stresses, which allowed a 10.08% reduction in the amount of steel without significantly affecting the beam's structural capacity. However, this use requires effective adhesion between the two materials to prevent premature failure due to sliding. Compression tests supported the viability of the system, recording strengths greater than 21 MPa in the concrete, a value compatible with structural applications. In conclusion, the use of Tacuara as a complementary reinforcement is presented as a sustainable and technically viable alternative in the region.

**Key words:** Quantity reduction, Tacuara bamboo, Bamboo-concrete adhesion, Hybrid behavior.

## INTRODUCCIÓN

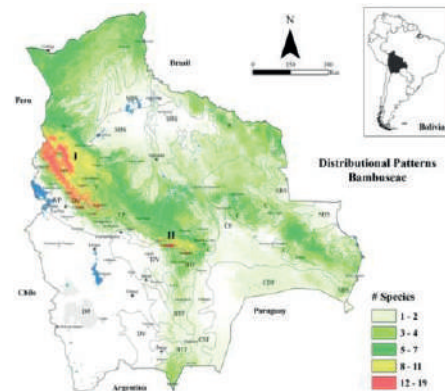
El uso exclusivo de acero como material de refuerzo en elementos de hormigón armado sometidos a flexión ha demostrado históricamente un desempeño estructural eficiente. No obstante, en contextos como el boliviano, el incremento en su costo y las dificultades de importación han motivado la búsqueda de alternativas sostenibles que complementen su función. Frente a este escenario, el bambú emerge como un recurso renovable con cualidades prometedoras, gracias a sus favorables propiedades mecánicas, rápido crecimiento y bajo impacto ambiental.

El impulso de la construcción sostenible en América Latina ha renovado el interés por materiales con tradición histórica en la región. El bambú, empleado ancestralmente en diversas comunidades para la construcción de viviendas, posee una amplia distribución geográfica, con 20 géneros y 429 especies identificadas desde México hasta Argentina (Torres et al., 2019).

A nivel global, de las aproximadamente 1250 especies de bambú registradas, el 63% se concentra en Asia, seguido de América con un 32%, mientras que África y Oceanía representan en conjunto el 5% restante. Cabe destacar que el continente americano alberga una diversidad significativa, con 440 especies documentadas (Ticona et al., 2025).

En Bolivia, se han identificado alrededor de 50 especies, entre las que destaca el bambú tacuara del género *Guadua*, con 12 especies presentes en el territorio. Este estudio se centra específicamente en el bambú tacuara procedente de Villa Tunari, en el departamento de Cochabamba, zona reconocida por sus condiciones agroclimáticas favorables y por contar con plantaciones establecidas de esta especie (Hachmeyer, 2020). La selección de este material se fundamenta en su disponibilidad local, sus propiedades mecánicas y su potencial como recurso

renovable aplicable en construcción, en línea con los principios de sostenibilidad y valorización de materiales autóctonos.



**Figura 1.** Distribución de especies de bambú en Bolivia (Hachmeyer, 2020)

En este marco, la presente investigación evalúa el comportamiento a flexión de vigas de hormigón armado con refuerzo mixto de acero y bambú, analizando además la adherencia entre el bambú y la matriz de hormigón, y complementando el estudio con ensayos de compresión para caracterizar integralmente su respuesta mecánica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación del bambú Tacuara como material de refuerzo en elementos de hormigón armado sometidos a flexión se realizó mediante técnicas experimentales que permiten caracterizar su comportamiento estructural.

### Dosificación del Hormigón

Material	Cantidad
Cemento IP-40 (kg/m <sup>3</sup> )	366
Grava (kg/m <sup>3</sup> )	1150.736
Arena (kg/m <sup>3</sup> )	797.462
Agua (L/m <sup>3</sup> )	169.864

**Tabla 1:** Dosificación del hormigón H21 por m<sup>3</sup>, (NB-1225001,2013)

### Materiales para el vaciado de probetas

Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Agua (lts)
1.94	6.1	4.23	0.9

**Tabla 2:** Materiales para el vaciado de probetas cilíndricas.

Para los ensayos de compresión, se utilizaron probetas cilíndricas de 15 × 30 cm, fabricadas y curadas de acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM C39, que establece el procedimiento estándar para este tipo de evaluaciones

Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Agua (lts)
4.12	12.95	8.97	1.92

**Tabla 3:** Materiales para el vaciado de probetas prismáticas.

Para caracterizar el comportamiento a flexión de las vigas, se empleará el método de ensayo a tres puntos.

**Propiedades mecánicas del Acero**

Para los ensayos de 3 puntos se utilizó aceros corrugados de diámetro de 8 mm para los refuerzos longitudinales y 6 mm para los estribos.

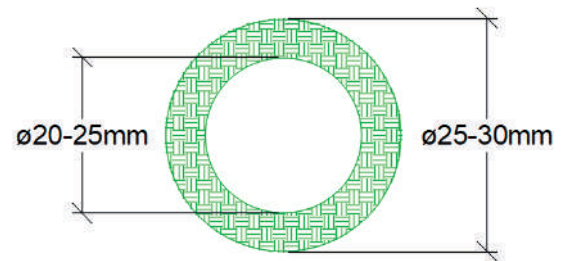
Diámetro (mm)	Sección Nominal	Límite de Fluencia (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)
6	28	420	620
8	50	420	620

**Tabla 4:** Propiedades Mecánicas y geométricas Del Acero Corrugado, (ASTM A615 Grado 60/ NTP 341.031:2018 Grado 420).

**Propiedades Geométricas del Bambú Tacuara**

Las probetas prismáticas se armaron utilizando barras de bambú tacuara como refuerzo

adicional donde presenta los siguientes parámetros geométricos:



**Figura 2:** Estructura promedio de bambú tacuara en Bolivia.

Diámetro Exterior (mm)	Diámetro Interior (mm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)
25-30	20-25	2-4	450

**Tabla 5:** Propiedades Geométricas del Bambú en Probetas prismáticas

**Propiedades mecánicas del Bambú-Tacuara**

El bambú tacuara es un material natural de origen vegetal, caracterizado por su estructura tubular hueca y la presencia de fibras longitudinales interconectadas mediante nudos transversales que le confieren rigidez y estabilidad dimensional. Con un peso específico de aproximadamente 0.6 g/cm³ (Gómez et al., 2016), presenta una elevada relación resistencia-peso, lo que lo posiciona como un material liviano con capacidades estructurales notorias.

El bambú es un material cuya rigidez depende de la dirección y tipo de esfuerzo, con comportamientos distintos en flexión, tracción y compresión. Su superficie, rica en lignina, lo hace resistente al desgaste y la abrasión. Con un tratamiento adecuado, puede durar hasta 30 años.

Para protegerlo de la humedad y el sol, se recomienda aplicar barnices, pinturas al aceite o recubrimientos asfálticos. En sus propiedades mecánicas, el bambú mantiene su resistencia a la fatiga en el tiempo, conserva su elasticidad

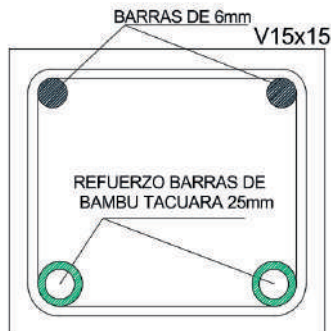
bajo tracción y mejora su resistencia a compresión con el envejecimiento natural.

Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	203900
Resistencia de Diseño (kg/cm <sup>2</sup> )	825
Resistencia Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	856
Resistencia Cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	23
Resistencia Tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	3058

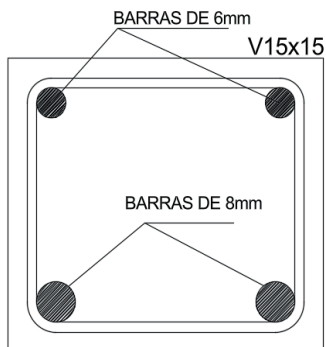
**Tabla 6:** Propiedades mecánicas del Bambú

### Estructura del material Híbrido Acero-Bambú

Esta investigación tiene como objetivo principal caracterizar las propiedades mecánicas de un refuerzo mixto compuesto por acero y bambú.



**Figura 3:** Esquema de viga con refuerzo mixto o híbrido (acero y bambú).



**Figura 4:** Esquema de viga con refuerzo convencional.

En la preparación de las armaduras, se utilizaron segmentos de bambú cortados con la mayor rectitud posible, facilitando el ensamblaje de la configuración mostrada en la Figura 3.



**Figura 5:** Barras de acero y bambú de 0.45m de longitud.

### Dimensiones de los elementos de bambú

Diámetro Exterior (mm)	Diámetro Interior (mm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)
30	26	2	450

**Tabla 7:** Propiedades Geométricas del Bambú usadas en el ensayo a compresión y flexión.

### Dimensiones de las barras de acero

Diámetro (mm)	Longitud (mm)
8	450

**Tabla 8:** Propiedades Geométricas de las barras de acero usadas en el interior de las barras de bambú.

### Armadura de Viga Sin Bambú Tacuara

Para el armado de la viga a escala se utilizó 2φ de 8 mm en la parte superior de la viga situada de manera longitudinal, 2φ de 6 mm en el parte inferior colocado de manera constructiva y estribos de φ 6mm / 12 cm. Se realiza con estas dimensiones respetando la cuantía mínima proporcionada por normativa.



**Figura 6:** Armadura de viga sin refuerzo de Bambú.

#### Armadura de Viga Con Bambú Tacuara

Para el armado de la viga a escala se utilizó las mismas propiedades geométricas que el armado convencional, implementando el bambú de  $\phi$  25mm en la parte inferior que resiste a tracción y en la parte superior  $\phi$  6mm.



**Figura 7:** Armadura de viga con refuerzo de Bambú.

#### Ensayo de Resistencia a la flexión en Vigas

Se realizaron ensayos de flexión sobre dos vigas a escala de 0.15 m  $\times$  0.15 m  $\times$  0.45 m, vaciadas en hormigón como un único bloque. Una de las vigas fue reforzada con acero

convencional (Fig. 6), mientras que la otra incorporó refuerzo de bambú (Fig. 7).



**Figura 8:** Aparato usado para el ensayo a flexión.

El ensayo de flexión se realizó aplicando una carga puntual en el centro de la viga mediante un rodillo, generando esfuerzos de tracción en la zona superior de la probeta y compresión en la zona inferior.

#### Ensayo a la Compresión



**Figura 9:** Aparato usado para el ensayo a compresión.

El aparato utilizado para compresión es el mismo que el de flexión, con la diferencia de la geometría de la probeta. Cada probeta tiene dimensiones estandarizadas de acuerdo a la Norma ASTM.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Análisis del Ensayo a Compresión

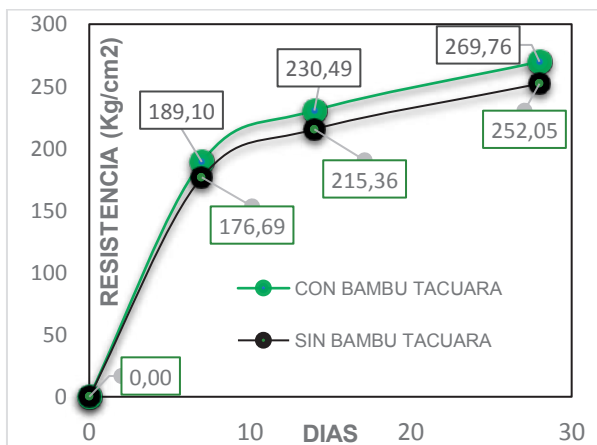
Se presenta a continuación los resultados del análisis del comportamiento mecánico del bambú en interacción con el hormigón:

#### 1.Capacidad resistente:

RESULTADO ENSAYO A COMPRESIÓN		
Muestra	Días	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>Probeta de control</b>		
T-C1	7	176.69
T-C2	14	215.35
T-C3	28	252.05
<b>Probeta con bambú</b>		
T-CB1	7	189.10
T-CB2	14	230.49
T-CB3	28	269.76

Tabla 9: Resultados de ensayo a compresión.

Las probetas con el refuerzo de bambú (figura 7) alcanzaron una resistencia última promedio de 269.76 kg/cm<sup>2</sup>, equivalente al **107.02 %** de la capacidad a compresión de la probeta de control.



Gráfica 1: Comparación de curvas de resistencia a compresión.

### Comportamiento de adherencia

La interacción entre el bambú y el hormigón evidenció un desempeño favorable, ya que el fallo no se produjo en la unión de los materiales, sino en el propio hormigón con la dosificación establecida, confirmando la adecuada adherencia entre ambos componentes.



Figura 10: Modo de falla de la probeta cilíndrica con la implementación del bambú tacuara.

### Análisis del Ensayo a Flexión

RESULTADO ENSAYO A FLEXIÓN		
Muestra	Días	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>Probeta de control</b>		
T-F1	7	83.31
T-F2	14	90.17
T-F3	28	94.97
<b>Probeta con bambú</b>		
T-FB1	7	93
T-FB2	14	100.07
T-FB3	28	105.38

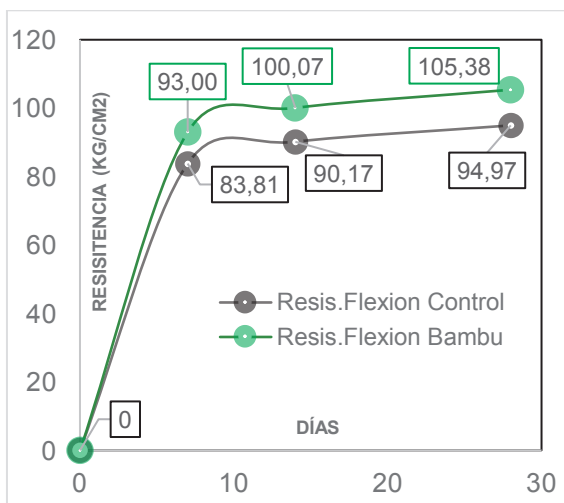
Tabla 10: Resultados de ensayo a flexión.

COMPARACIÓN REST.FLEXIÓN	
Probeta de control (kg/cm <sup>2</sup> )	Probeta con bambú (kg/cm <sup>2</sup> )
94.97	105.38

83.31	93
90.17	100.07
94.97	105.38

**Tabla 11:** Tabla comparativa de resultados

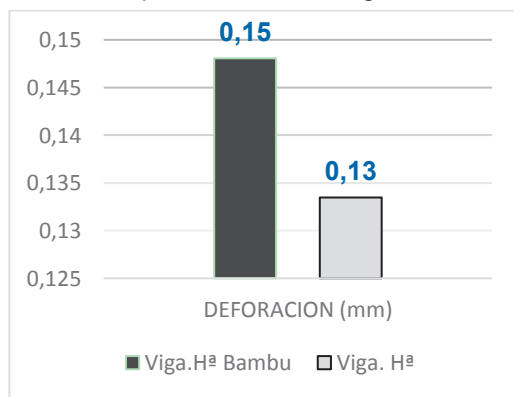
Finalmente se presenta los resultados del análisis del comportamiento mecánico de la viga prismática de 15cmx15cm con refuerzo mixto acero-bambú:



**Gráfica 2:** Comparación de curvas de resistencia a flexión.

**Deformación y ductilidad:**

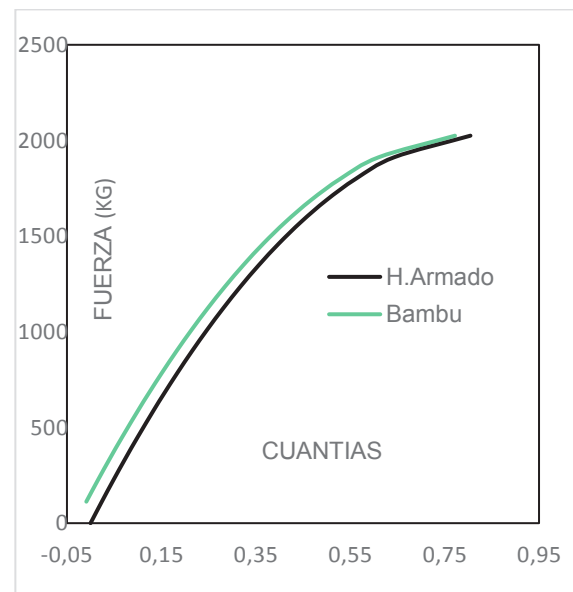
Se observó que los elementos híbridos presentaron mayores deformaciones antes de la falla, lo cual indica un comportamiento más dúctil en comparación con las vigas de control.



**Gráfica 3:** Comparación de deformaciones.

**Optimización de cuantías:**

El empleo del bambú como refuerzo longitudinal permitió optimizar la cuantía de acero en los elementos estructurales, alcanzando una reducción del **5.04 %** por reemplazo de barra de acero longitudinal. En el ensayo realizado, esta mejora se tradujo en una disminución total del **10.08 %** en la cuantía de acero, sin afectar de manera significativa la resistencia estructural de los especímenes.



**Gráfica 4:** Comparación de cuantías.

**CONCLUSIONES**

El refuerzo híbrido compuesto por barras de acero y bambú tacuara ha demostrado un comportamiento estructural favorable, manteniendo la capacidad resistente del elemento sin alteraciones significativas frente al comportamiento a flexión de la viga de control.

Los ensayos a compresión alcanzaron una resistencia promedios de 107.02% respecto a las probetas de control, confirmando una buena interacción entre el bambú y el hormigón.

Se presentaron mayores deformaciones en los ensayos a flexión con el material híbrido acero-bambú garantizando un comportamiento dúctil.

La adherencia entre bambú y hormigón resultó adecuada, evidenciando que las fallas se produjeron en el hormigón y no en la unión de los materiales.

El refuerzo longitudinal mixto permitió optimizar la cuantía de acero en un 10.08 % (reforzando las dos barras longitudinales), reduciendo el consumo de acero sin afectar de manera significativa la capacidad resistente.

Se logró una optimización del 5.04 % en la cuantía de acero. En casos donde se emplean mayores cantidades de barras longitudinales, este sistema puede aplicarse de manera progresiva, alcanzando una reducción potencial de hasta el 20.16 % al usar cuatro barras de bambú, sin comprometer el comportamiento estructural del elemento.

Los resultados demuestran que el bambú tacuara puede trabajar en conjunto con el acero, permitiendo reducir la cantidad de este último en elementos sometidos a flexión.

Se prevé que el uso controlado del bambú tacuara en elementos estructurales podría reducir costos de construcción especialmente en proyectos de bajo presupuesto.

El comportamiento a largo plazo (fluencia, humedad, fatiga) del bambú en contacto con el hormigón requiere ensayos complementarios de durabilidad y adherencia para establecer parámetros de diseño más precisos.

Se debe realizar ensayos complementarios para determinar la influencia del porcentaje de humedad del bambú respecto al tiempo, ya que la reducción del porcentaje de humedad reduce la sección del bambú y puede afectar la adherencia

Se sugiere la normalización de propiedades mecánicas del bambú tacuara boliviano, ya que su variabilidad natural (nudos, espesores, humedad) influye directamente en la calidad del refuerzo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gómez Castro, R. C., & Acha Daza, N. (2016). *Tecnología del bambú*. México : ECORFAN (Economics, Management and Tourism Research Center).

Hachmeyer, S. (2020, Noviembre 23). *Tropical Woody Bamboo Species Richness Map*.

Retrieved from [https://musicalbamboos.com/2025/06/08/tropical-woody-bamboo-species-richness-map/?utm\\_source](https://musicalbamboos.com/2025/06/08/tropical-woody-bamboo-species-richness-map/?utm_source)

Javed, H., Hussein, S., & Ahmed, Z. (2024). Refuerzo de bambú: un compuesto ecológico para el acero. *researchgate*.

DOI:[<https://doi.org/10.32732/jcec.2024.13.4.170>], 9.

Ticona Aliaga, J., & Mamani Mollo, J. (2025). EVALUACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE BAMBÚ (*Guadua angustifolia* Kunth y *Guadua Scielo* [[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2409-16182019000100004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182019000100004&lng=es&tlng=es)], 8.

Torres, B., Segarra, M., & Bragança, L. (2019). El bambú como alternativa de. *researchgate*, 13.





# EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE ALTERNATIVAS SOSTENIBLES EN EL TRAZADO DE LA CARRETERA SUCRE–SANTA CRUZ MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Parina, J.<sup>a</sup>, Copa, K.<sup>b</sup>, Huaranca, J.<sup>c</sup>, Ramos, H.<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Estudiante Investigador en el área de vías, geodesia y topografía de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: [juanpabloparinatorihuano@gmail.com](mailto:juanpabloparinatorihuano@gmail.com)

<sup>b</sup> Estudiante Investigador en el área de vías de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: [kevn copa@gmail.com](mailto:kevn copa@gmail.com)

<sup>c</sup> Estudiante Investigador en el área de hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: [huarancamaciell@gmail.com](mailto:huarancamaciell@gmail.com)

<sup>d</sup> Docente en el área de hidráulica e Impacto Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: [hr5332807@gmail.com](mailto:hr5332807@gmail.com)

Recibido: 01/10/2025 Aceptado: 01/10/2025 Publicado: 01/10/2025

## RESUMEN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas fundamentales para la planificación de infraestructura vial sostenible, especialmente en regiones con alta complejidad topográfica y sensibilidad ecológica, como la ruta Sucre–Santa Cruz en Bolivia. El trazado actual de esta carretera (356 km) presenta un alto grado de conflicto espacial, evidenciado por la intercepción con 77 centros poblados, la afectación de ecosistemas únicos (como el Jardín de Cactáceas de Comarapa) y la presencia de tramos con alto riesgo geológico.

En este estudio, se aplicó un Análisis de Mínimo Costo Acumulativo (Least-Cost Path) sobre una Superficie de Costo que integró criterios de restricción ingenieriles, ambientales y sociales. Este análisis se basó en el Modelo Digital de Elevación (MDE), la normativa de pendiente longitudinal máxima ABC (12%) y el mapeo de áreas protegidas. Se generaron y evaluaron tres rutas alternativas.

Los resultados demuestran que el Trazado Óptimo Sostenible (TOS) (Ruta 3) es la alternativa más viable, con una longitud de 252.00 km. El TOS cumple con la pendiente máxima del 12% y ofrece una ventaja logística y ambiental significativa: reduce la longitud total en  $\approx 104$  km respecto a la vía actual, establece una conexión directa Sucre–Santa Cruz (evitando Cochabamba) y minimiza drásticamente el impacto ambiental a una afección marginal de 10 he, dentro del Parque Nacional Amboró, logrando evitar completamente el Jardín de Cactáceas y la Laguna Quirusillas (identificadas como restricciones absolutas).

**Palabras clave:** sostenibilidad, trazado de carreteras, sistemas de información geográfica SIG.

## ABSTRACT

Geographic Information Systems (GIS) are essential tools for sustainable road infrastructure planning, particularly in regions with high topographic complexity and ecological sensitivity, such as the Sucre–Santa Cruz route in Bolivia. The current highway layout (356 km) exhibits a high degree of spatial conflict, evidenced by the interception of 77 populated centers, the impact on unique ecosystems (such as the Comarapa Cactus Garden), and the presence of sections with high geological risk.

In this study, a Least-Cost Path Analysis was applied over a Cost Surface that integrated engineering, environmental, and social constraint criteria. This analysis was based on the Digital Elevation Model (DEM), the Bolivian maximum longitudinal slope standard (12%), and the mapping of protected areas. Three alternative routes were generated and evaluated.

The results demonstrate that the Optimal Sustainable Layout (TOS) (Route 3) is the most viable alternative.

**Key words:** sustainability, highway alignment, geographic information systems (GIS),

## INTRODUCCIÓN

Los impactos de la construcción de carreteras sobre la biodiversidad representan un aspecto crítico, ya que inciden directamente en el manejo de recursos hídricos, forestales y ecosistémicos en general. La apertura y ampliación de estas vías puede modificar el flujo natural de las aguas, provocar erosión del suelo e incrementar la contaminación de fuentes hídricas debido a sedimentos y compuestos químicos (Rodríguez et al., 2021). Tales efectos no solo comprometen el equilibrio ambiental, sino que también repercuten de manera directa en las comunidades locales, cuya subsistencia depende de la disponibilidad y calidad de estos recursos.

En Bolivia, en la última década, la noción de frontera como resguardo de la soberanía nacional ha prevalecido en la política pública, mientras que la conservación de la biodiversidad ha recibido menor atención, pese a la evidencia sobre los efectos del cambio climático (De Marchi Moyano, 2021). Un ejemplo de ello es la carretera Sucre–Santa Cruz, que carece de una evaluación ambiental actualizada respecto a aspectos geológicos y áreas protegidas. En este sentido, la evaluación de impacto ambiental no solo permite identificar efectos negativos, sino también proponer medidas de mitigación que reduzcan o compensen dichos impactos, buscando un equilibrio entre desarrollo vial y sostenibilidad.

Uno de los principales desafíos en la evaluación de impactos ambientales de proyectos viales radica en la dificultad de medir sus efectos sobre la biodiversidad. La construcción de carreteras puede ocasionar la fragmentación de hábitats, modificar los patrones de desplazamiento de la fauna y comprometer la supervivencia de diversas especies, particularmente en zonas con alta biodiversidad y gran sensibilidad ecológica (Mendoza et al., 2022). Dado que los factores económicos suelen ser determinantes en este tipo de proyectos, se ha considerado pertinente la realización de ensayos y pruebas en modelos a escala reducida como una alternativa metodológica

En el Valle del Cauca, se ha demostrado que la presión sobre los ecosistemas naturales, originada por la deforestación, la alteración de cuerpos de agua, la contaminación, la caza y el tráfico de fauna silvestre, ha provocado la pérdida de especies y ha puesto a otras en situación de vulnerabilidad. La investigación de Stasiukynas et al. (2021) abordó este problema específicamente en el contexto de las vías, destacando que la construcción de carreteras en áreas naturales puede fragmentar hábitats, interrumpir corredores biológicos y aumentar la mortalidad de fauna debido a atropellamientos. Para evaluar estos efectos, los autores emplearon Sistemas de Información Geográfica (SIG) para modelar corredores de fauna y analizar la conectividad ecológica, complementando el análisis con recorridos de campo para registrar atropellamientos y evaluar la funcionalidad de estructuras viales existentes, como puentes y alcantarillas, en términos de su utilidad para el paso de fauna. En este contexto, Sucre-Santa Cruz, como uno de los departamentos más ricos en biodiversidad y ecosistemas de Bolivia, requiere la aplicación de SIG para identificar áreas críticas y diseñar alternativas de trazado que minimicen los impactos ambientales, preserven la conectividad ecológica y contribuyan a la conservación de sus recursos naturales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se ha desarrollado mediante una revisión bibliográfica y un análisis de datos primarios recolectados en el contexto de la carretera actual Sucre-Santa Cruz. La metodología se ha estructurado en varias fases, que incluyen la caracterización del área de estudio, la recolección de datos satelitales, recopilación de información documental, el análisis de impactos ambientales en la construcción de carreteras y la propuesta de medidas de mitigación. A continuación, se describen en detalle cada una de estas fases

### Caracterización del Área de Estudio:

La carretera Sucre-Santa Cruz abarca una longitud de 356 km, y se accede a ella

iniciando la Ruta 6 de Sucre y finalizando en la doble vía La Guardia de Santa Cruz, con un total de 13 horas de viaje aproximadamente en flota, esta carretera pasa por 70 poblaciones aproximadamente, principalmente por los municipios de: Sucre, Aiquile, Mairana, Samaipata entre otros.

**Recopilación de datos:**

**Delimitación de la carretera actual Sucre-Santa Cruz**

Para el desarrollo del estudio se emplearon herramientas de análisis geoespacial con el fin de caracterizar el área de influencia de la carretera.

En primer lugar, se delimitó el tramo en análisis mediante Google Earth, identificando los puntos de inicio y fin de la vía, a partir de los cuales se generó un archivo en formato KML con el trazado actual de la carretera.

Posteriormente, se obtuvo el Modelo de Elevación Digital (DEM) de la plataforma de la NASA Space, que permitió representar la topografía del área de estudio. Este insumo fue procesado en ArcMap, donde se aplicaron diversas herramientas de análisis tales como se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Herramientas aplicadas en ArcMap a partir del DEM (Modelo Digital de Elevación).*

Herramienta	Función principal
Hillshade y Slope	Visualizar el relieve y calcular las pendientes del terreno.
Aspect	Identificar la orientación de las laderas.
Contour	Generar curvas de nivel a partir del DEM.
Spatial Analyst Tools	Realizar análisis de elevación y pendientes de manera más detallada.
Overlay y Buffer	Superponer el trazado de la carretera y determinar el área de influencia directa sobre comunidades y ecosistemas cercanos.

*Nota: esta tabla muestra las herramientas de SIG, utilizando el software ArcMap*

**Procesamiento en SIG (ArcMap/ArcGIS)**

**Mapa de vegetación y uso de suelos**

Las pendientes pronunciadas incrementan el riesgo de erosión y deslizamientos, mientras que la vegetación contribuye a estabilizar los suelos (Rodríguez et al., 2021). La integración de estos factores permite identificar zonas críticas donde la construcción puede causar pérdida de vegetación, fragmentación de hábitats y alteración del flujo hídrico. Ignorar estos elementos incrementan significativamente los impactos ambientales negativos, afectando la biodiversidad y la calidad de los recursos naturales (Mendoza et al., 2022). Este mapa aporta información a la carretera Sucre-Santa Cruz puesto que atraviesa zonas con variaciones topográficas importantes, por lo que este análisis ayuda a priorizar tramos con menor riesgo ambiental y mantener la integridad de los ecosistemas locales.

**Tabla 2**

*Herramientas para la determinación del Mapa de vegetación y uso de suelos*

Herramienta	Función principal
Slope	Análisis de pendientes
Raster Calculato	Combinar capas
Reclassify	Clasificar áreas críticas

*Nota: esta tabla muestra las herramientas de SIG, utilizando el software ArcMap*

### Mapa de Cobertura de Suelos – Cobertura Vegetal

Relaciona los tipos de suelo con la cobertura vegetal y los ecosistemas presentes.

Suelos con baja resistencia o altamente erosivos requieren un diseño cuidadoso para evitar daños durante y después de la construcción (Novak et al., 2010). La cobertura vegetal también indica la presencia de hábitats críticos para fauna y flora, cuya fragmentación puede afectar la conectividad ecológica (Stasiukynas et al., 2021). Esta información permite priorizar rutas que minimicen la afectación de suelos frágiles y ecosistemas sensibles, optimizando la sostenibilidad del trazado actual y la nueva alternativa Sucre-Santa Cruz.

**Tabla 3**

*Herramientas para la determinación del Mapa de Cobertura de suelos y Cobertura Vegetal*

Herramienta	Función principal
Raster Overlay	Superposición de capas
Extract by Mask	Extraer áreas específicas
Reclassify	Clasificación de suelos

*Nota: esta tabla muestra las herramientas de SIG, utilizando el software ArcMap*

### Mapa de Zona de Deslizamiento – Zona Geológica

Combina la susceptibilidad a deslizamientos con información geológica del área.

Según Rodríguez et al., 2021). Identificar zonas con riesgo geotécnico reduce accidentes, costos de mantenimiento y protege ecosistemas (Vergara, 1993; Rodríguez et al., 2021).

Carreteras en áreas propensas a deslizamientos pueden causar erosión, sedimentación en ríos y

pérdida de hábitats, afectando tanto la biodiversidad como las comunidades locales. Este análisis permite evitar o mitigar en nuestro proyecto tramos de alto riesgo y planificar medidas de protección ambiental y geotécnica.

**Tabla 4**

*Herramientas para la determinación de la Zona de deslizamiento y Zona Geológica*

Herramienta	Función principal
Slope y Aspect	Extraer pendientes y Orientación+
Weighted Overlay	Identificar Riesgo Combinado
Reclassify	Clasificación de niveles de riesgo

*Nota: esta tabla muestra las herramientas de SIG, utilizando el software ArcMap*

### Mapa de Áreas Protegidas – Zonas de Forestación

Muestra la superposición entre áreas protegidas y zonas forestales cercanas al trazado. Según (De Marchi Moyano, 2021; Mendoza et al., 2022). Evitar la afectación directa de estas zonas protege la biodiversidad, mantiene especies amenazadas y asegura servicios ecosistémicos como regulación hídrica y captura de carbono

Identificar tramos que atraviesan áreas críticas en el trazado de la carretera Sucre-Santa Cruz permite ajustar el diseño del trazado y reducir la fragmentación de hábitats.

**Tabla 5**

*Herramientas para la determinación de la Zona de deslizamiento y Zona Geológica*

Herramienta	Función principal
Intersec	Superposición de capas
Buffer	Identificación de las zonas de influencia
Select by Location	Selección de áreas críticas

Nota: esta tabla muestra las herramientas de SIG, utilizando el software ArcMap

### Propuesta de alternativas de trazado sostenible

#### Alternativa – Centros Poblados, Ríos, Áreas Protegidas

Integra centros poblados, ríos y áreas protegidas para evaluar rutas alternativas.

Propone rutas minimizando intervención en áreas críticas y priorizando corredores ecológicos.

Tabla 6

Herramientas para la determinación de la Zona de Alternativas-Centros Poblados y Ríos

Herramienta	Función principal
Analysis Toolbox	Union / Intersección
Buffer	Protección de zonas sensibles
Select by Location	Evaluación de rutas alternativas

Nota: esta tabla muestra las herramientas de SIG, utilizando el software ArcMap

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis preliminar se centró en la definición de las restricciones espaciales del área de estudio, estableciendo la base para la superficie de costo utilizada en el proceso de optimización. Este diagnóstico inicial se fundamentó en la integración de un Modelo Digital de Elevación (MDE) y un conjunto de capas de información georreferenciada que representan factores limitantes para el trazado vial.

Las capas clave integradas para la ponderación fueron:

- Restricciones Ambientales y de Biodiversidad:** Se realizó un mapeo detallado de las áreas protegidas (p. ej., el Parque Nacional Amboró y el Área Natural de Manejo Integrado El Palmar), zonas forestales y recursos hídricos. Se determinó que los cuerpos de agua estancada, como la Laguna Quirusillas, representan una restricción absoluta (*hard barrier*), dado que la mitigación de ríos es posible, pero la afectación de lagunas resulta en un impacto ambiental irreversible.
- Riesgo Físico y Geológico:** Se incluyó el mapa de pendientes (en porcentaje), aplicando una penalización (costo) a las celdas que excedían los umbrales de seguridad ingenieril, característicos del terreno montañoso. Además, se delimitó el riesgo geológico (deslizamientos e inestabilidad de taludes), clasificándose categóricamente (p. ej., Baja, Moderada y Grave). Esta clasificación se utilizó para asignar un costo de construcción y mitigación directamente proporcional al nivel de riesgo.
- Restricciones Socio-Culturales:** Se georreferenció la ubicación de centros poblados para evitar la fragmentación social y la afectación a bienes patrimoniales.

## Caracterización y Evaluación del Trazado

### Actual Sucre-Santa Cruz

A continuación, se aprecia la Figura 1 ilustra la carretera actual Sucre-Santa Cruz donde se identifican alrededor de 77 centros poblados, así como una longitud de 356km.

**Figura 1**

#### Análisis General del Trazado y Contexto Demográfico



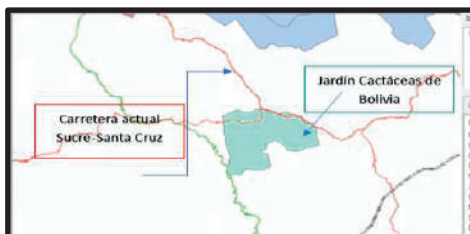
*Nota: Ruta Sucre-Santa Cruz-Google Earth*

### Implicaciones Ambientales del Recorrido

El estudio de mapeo de áreas protegidas, presentado en la Figura 2, arrojó un hallazgo crítico, debido a que la carretera pasa por el Jardín Nacional que abarca alrededor de 200.000ha. Este hecho subraya un impacto ambiental directo que debe ser considerado en la fase de mitigación de cualquier proyecto de mejora o alternativa.

**Figura 2**

*Mapeo de áreas protegidas en la carretera actual*



*Nota: El análisis espacial identificó que el trazado actual de la carretera **atraviesa** el polígono del **Jardín de Cactáceas** en el municipio de Comarapa (Santa Cruz).*

Análisis de Impacto: Suelos, Deslizamiento, Zonas Forestales y recursos hídricos

**Tabla 7**

Mapeo de los riesgos de deslizamientos

Herramienta	Función principal
Analysis Toolbox	Unión / Intersección
Buffer	Protección de zonas sensibles
Select by Location	Evaluación de rutas alternativas

*Nota: La tabla, subraya la necesidad de concentrar los esfuerzos de ingeniería y prevención en el 30% de las zonas de riesgo Alto y Moderado, mientras que se mantiene una vigilancia cautelosa en el amplio 60% de la zona Moderada Baja.*

**Tabla 8**

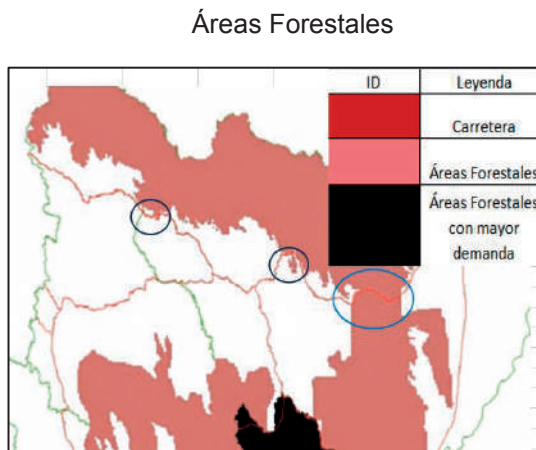
Mapeo geológico de suelos

Tramo	Código SERGEO TE CMN (Local)	Descripción del Perfil del Suelo
Nuevo Tramo A	I-Be-Lc-c	Suelo Inorgánico (I), Bien Drenado (Be), de origen Limoso/Luvisol (Lc) y textura Arcillosa (c).
Nuevo Tramo B	I-Lc-c	Suelo Inorgánico (I) de origen Limoso/Luvisol (Lc) y textura Arcillosa (c). (Drenaje no especificado).
Nuevo Tramo C	I-c	Suelo Inorgánico (I) de textura Arcillosa (c).
Nuevo Tramo D	Lc	Subunidad de Luvisol (Lc) o suelo de origen limoso/loésico, con códigos secundarios que indican características específicas del perfil.
Nuevo Tramo E	Lc-c	Luvisol (Lc) con subunidad 6 y textura Arcillosa (c).

Nota: La tabla, identifica el buen drenaje del Tramo A como un punto a favor, pero el proyecto debe ser diseñado principalmente para **gestionar el riesgo y la inestabilidad inherentes a los suelos arcillosos y poco drenados** que caracterizan la mayoría de los demás segmentos.

Nota: la ausencia de cruces sobre lagunas representa un beneficio inherente en la mitigación, permitiendo enfocar los esfuerzos de protección en la correcta gestión de los recursos hídricos.

Figura 3



Nota: La figura 3 evidencia que la carretera actual, circula por tres pequeños segmentos de área forestal, conlleva importantes implicaciones que deben abordarse desde la mitigación para minimizar los impactos ambientales y sociales

### Generación y Caracterización de Rutas Alternativas

A partir de la Superficie de Costo, se aplicó el algoritmo del Mínimo Costo Acumulativo (*Least-Cost Path*) en el entorno SIG para generar rutas alternativas que minimicen el impacto ambiental, social y el costo ingenieril. Para ello, se definieron tres escenarios de ponderación que priorizaron diferentes combinaciones de restricciones físicas y ambientales, dando como resultado tres trazados principales como se observa en la **Figura 5**.

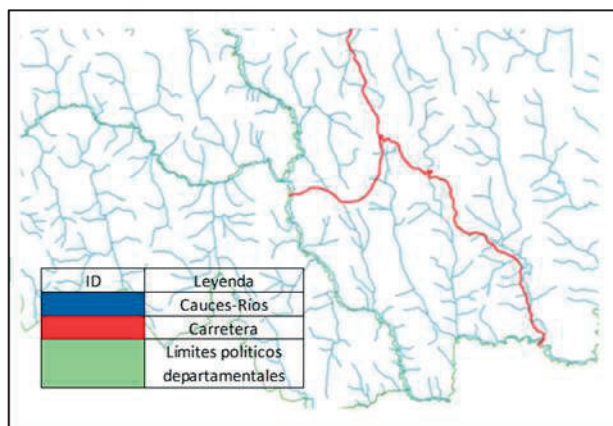
Tabla 9

Rutas en función a la Cobertura Vegetal y pendientes de terreno.

Ruta	Prioridad de Ponderación	Pendiente Máxima (%)	Cobertura Vegetal (CV) en la ponderación (%)	Longitud (km)
Ruta 1	Prioridad Alta a Cobertura Vegetal	45%	55%	255.63
Ruta 2	Balance entre Pendiente y CV	30%	70%	251.31
Ruta 3	Prioridad Alta a Pendiente y Norma	12%	88%	252

Figura 4

### Recursos Hídricos



Nota: La tabla, identifica a la mejor ruta en función a la topografía y costo(longitud)

El análisis preliminar de estas alternativas se centró en la factibilidad ingenieril (pendiente) y la sostenibilidad ambiental (cobertura vegetal y áreas protegidas), tal como se detalla a continuación.

El criterio ingenieril fue el primer filtro de selección. La Norma Boliviana de Carreteras (ABC) para Terreno Montañoso establece una pendiente longitudinal máxima recomendada del 12%. Por lo tanto, las Rutas 1 y 2 (con pendientes de 45% y

30%) fueron descartadas por su inviabilidad técnica, alto costo de construcción y elevado riesgo de inestabilidad geotécnica.

Aunque la Ruta 2 presentó la menor longitud (251.31 km), la Ruta 3, con una longitud competitiva de 252 km, fue la única que cumplió con la restricción de pendiente del 12%, garantizando así la factibilidad constructiva y la seguridad vial.

### Análisis Cuantitativo de Impacto Ambiental

De acuerdo al resultado de la **Figura 5**. Se cuantificó la superficie de las áreas protegidas nacionales y municipales que serían afectadas directamente por el trazado de cada alternativa:

- Ruta 1: Presentó el mayor impacto, afectando el Área Natural de Manejo Integrado El Palmar y el Parque Nacional Amboró con una superficie total de aproximadamente 25 hectáreas.
- Ruta 2: El conflicto principal se localizó en la Laguna Quirusillas (área de exclusión absoluta), con una afección de ≈61.35 hectáreas, además de un impacto adicional de 20 hectáreas en el Parque Nacional Amboró.
- Ruta 3 (TOS): El análisis espacial demostró que esta ruta logra evitar por completo el Área Natural de Manejo Integrado El Palmar y la Laguna Quirusillas. Si bien presenta un cruce marginal de aproximadamente 10 hectáreas dentro del Parque Nacional Amboró, este impacto es el menor de las tres alternativas y se localiza en una zona de amortiguamiento evaluada como menos sensible, demostrando la eficacia de la ponderación SIG.

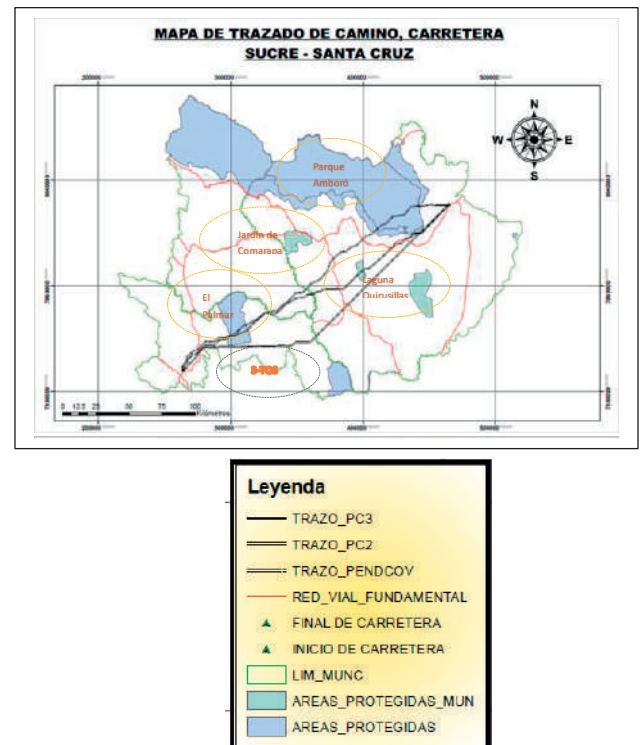
### CONCLUSIONES

La evaluación se consolidó con un análisis cuantitativo de los impactos en áreas protegidas, siendo este un criterio determinante de sostenibilidad:

- Ruta 1 y Ruta 2 fueron descartadas por su alto conflicto ambiental y su inviabilidad técnica. La Ruta 1 afectaba al Área Protegida de El Palmar y al Parque Nacional Amboró con aproximadamente 25 hectáreas. La Ruta 2, a pesar de su corta longitud, impactaba la Laguna Quirusillas (una restricción absoluta) y el Amboró con 20 ha. La Ruta 3, a pesar de ser ligeramente más larga que la Ruta

**Figura 5**

Resultados de la optimización de rutas sostenibles Sucre-Santa Cruz



*Nota: La figura 5 identifica el trazado más óptimo y sostenible para la mitigación de impactos ambientales*

- 2, demostró la mayor optimización espacial al lograr evitar por completo el Área Natural de Manejo Integrado El Palmar y la Laguna Quirusillas. Solo presentó una afección marginal de aproximadamente 10 hectáreas dentro del Parque Nacional Amboró.

En consecuencia, el rigor del análisis SIG, que penalizó los altos costos de mitigación y el incumplimiento normativo, condujo a la selección de la Ruta 3 como el Trazado Óptimo Sostenible (TOS). Esta alternativa equilibra de manera efectiva los criterios económicos (longitud competitiva), ingenieriles (pendiente de 12%) y ambientales (mínima afección a ecosistemas críticos).

Adicionalmente, el Trazado Óptimo Sostenible (Ruta 3) ofrece una ventaja logística significativa al establecer una **conexión vial directa entre Sucre y Santa Cruz**. A diferencia de los trazados tradicionales que a menudo incluyen la interconexión a través de otros ejes troncales pasando por **Cochabamba**, la Ruta 3 optimiza el flujo de tráfico, reduciendo la distancia total en ≈104 km respecto a la vía actual (356 km) y mejorando la eficiencia del transporte entre estas dos capitales.

Posicionándose como la solución más viable y responsable para la conectividad vial Sucre–Santa Cruz.

## RECOMENDACIONES

Evidenciamos la eficiencia de las herramientas SIG en la evaluación de rutas sostenibles, sin embargo, podemos mejorar los resultados de esta investigación utilizando un análisis geoespacial detallado a partir de información más precisa, así como la información de la Nasa con imágenes de mayor resolución las cuales llegan hasta 2 metros de precisión. Cabe mencionar que estas imágenes con alta resolución, no son gratuitas y llegan a tener un costo de hasta por lo menos 50.000\$.

Por lo que se recomienda trabajar en políticas necesarias que hagan posible la adquisición de estas herramientas para seguir evaluando diferentes riesgos ambientales en las carreteras de Bolivia,

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

De Marchi Moyano, B. (2021). Dinámicas fronterizas de Bolivia y áreas protegidas nacionales. *Diálogo Andino*, 66, 285–297. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812021000300285>.

Stasiukynas, A., Poškus, M., & Vaitkus, A. (2021). *Road infrastructure planning and biodiversity conservation: GIS-based approaches*. *Environmental Impact Assessment Review*, 87, 106515.

Stasiukynas, D. C., Mejía, Á., Lizarazo, J., Wagner-Wagner, C. M., Gómez, M. F., & Payán, E. (2021). Estudio sobre el impacto de los vertebrados silvestres y los ecosistemas circundantes en dos corredores viales de Colombia. *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad*, 13(24), 15–40. <https://doi.org/10.22430/21457778.1637>.

Bremen, R., and Hager, W. H. (1989). "Experiments in side-channel spillways." *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:5(617), 617–635.

Chanel, P. G. and Doering J. C. (2007), "An evaluation of computational fluid dynamics for spillway modelling", *Proc. 16th AMFC*, 1201-1206.

De Marchi Moyano, J. (2021). *Áreas protegidas y biodiversidad: desafíos para la conservación en América Latina*. *Revista Geográfica Venezolana*, 62(2), 145–162. <https://doi.org/10.5935/rvgn.v62n2.1234>

Mendoza, G., Vargas, J., & López, P. (2022). *Evaluación ambiental de proyectos viales: un enfoque desde la cobertura vegetal y los ecosistemas*. *Revista Latinoamericana de Medio Ambiente*, 14(1), 55–72. <https://doi.org/10.22201/rlma.2022.14.1.005>

Novak, J. M., Watts, D. W., & Stone, K. C. (2010). *Environmental factors influencing soil erosion and conservation planning*. *Journal of Soil and Water Conservation*, 65(3), 121–129. <https://doi.org/10.2489/jswc.65.3.121>

Rodríguez, F., Hernández, A., & Pérez, D. (2021). *Impacto de la pendiente y la cobertura vegetal en el diseño de infraestructura vial*. Ingeniería y Territorio, 18(2), 88–101. <https://doi.org/10.14198/ing.2021.18.2.88>.

<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106515>

Vergara, R. (1993). *Estudios geológicos aplicados a la planificación de xaasxscarreteras en zonas de riesgo*.

Revista de Geología Aplicada, 9(1), 45–60.

Esri. (2020). *ArcGIS Desktop: Release 10.8* [Software de sistema de información geográfica]. Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com>





# ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN MEDIANTE MEDICIONES HIDROLÓGICAS EN UNA CUENCA DE ALTA MONTAÑA

Zapata, R.<sup>a</sup>, Hernández, C.<sup>b</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

Recibido: 30/09/2022

Aceptado: 06/10/2022

Publicado: 07/11/2022

## RESUMEN

El tiempo de concentración ( $T_C$ ) es un parámetro hidrológico esencial para estimar caudales pico y diseñar obras hidráulicas, cuya precisión depende de las condiciones fisiográficas y climáticas locales. Este estudio evalúa la aplicabilidad de cinco métodos empíricos (Kirpich, Giandotti, Témez, SCS, y Passini) en la cuenca de alta montaña Kaynacas (Bolivia), contrastándolos con valores de  $T_C$  y tiempo de desfase ( $T_L$ ) obtenidos a partir de hidrogramas construidos con datos observados de precipitación y caudal. La precipitación efectiva se estimó mediante el método del índice  $\phi$  y el análisis de pérdidas iniciales. Los resultados muestran una variabilidad moderada entre métodos, con un  $T_C$  medio empírico de 2,76 h y un  $T_C$  observado de 3,66 h, es decir, aproximadamente 30 % mayor. Las ecuaciones que integran flujo superficial y de canal (Giandotti y Témez) presentaron la mejor correspondencia con los valores observados, mientras que Kirpich y Passini tendieron a subestimar el  $T_C$ . La relación  $T_L/T_C \approx 0,6$  se mantuvo estable, confirmando la coherencia física del desfase hidrológico. Se concluye que la calibración local de ecuaciones empíricas mejora significativamente la representación del comportamiento hidrológico en cuencas altoandinas, aportando bases metodológicas para el desarrollo de relaciones  $T_C$ -geomorfología ajustadas a condiciones regionales.

**Palabras clave:** tiempo de concentración; tiempo de desfase; métodos empíricos; cuencas altoandinas; calibración hidrológica.

## ABSTRACT

The time of concentration ( $T_c$ ) is a key hydrological parameter for peak-flow estimation and hydraulic design, whose accuracy depends on local physiographic and climatic conditions. This study evaluates the applicability of five empirical methods (Kirpich, Giandotti, Témez, SCS and Passini) in the Kaynacas high-Andean basin (Bolivia), comparing their results with  $T_c$  and lag time ( $T_L$ ) values derived from hydrographs constructed with observed rainfall and discharge data. Effective rainfall was estimated using the phi-index method and initial loss analysis. Results indicate a moderate variability among methods, with an average empirical  $T_c$  of 2.76 h and an observed  $T_c$  of 3.66 h, approximately 30% higher. Equations that integrate both surface and channel flow components (Giandotti and Témez) provided the best agreement with observed values, whereas Kirpich and Passini tended to underestimate  $T_c$ . The  $T_L/T_c \approx 0.6$  ratio remained consistent, confirming the physical coherence of hydrological lag. It is concluded that local calibration of empirical equations significantly improves the hydrological representation of high-Andean catchments, providing a methodological basis for developing regionally adjusted  $T_c$ -geomorphology relationships.

**Key words:** time of concentration; lag time; empirical methods; high-Andean catchments; hydrological calibration

## INTRODUCCION

El tiempo de concentración (TC) es un parámetro hidrológico fundamental para describir la respuesta de una cuenca ante un evento de precipitación, ya que representa el tiempo requerido para que el flujo superficial generado en el punto más distante alcance la salida de la cuenca (Gericke & Smithers, 2014). Su estimación constituye un componente esencial en la modelación hidrológica, simulación de escorrentía y diseño hidráulico, aunque continúa siendo una de las variables con mayor incertidumbre debido a la diversidad de criterios y métodos existentes para su cálculo (Beven, 2020; Michailidi et al., 2018).

La estimación del TC se realiza frecuentemente mediante ecuaciones empíricas, debido a su simplicidad operativa y a la disponibilidad de los parámetros geomorfológicos necesarios como área de cuenca, longitud del cauce principal y pendiente media (McCuen, 2009), sin embargo; diversos estudios han demostrado discrepancias significativas entre los resultados obtenidos con diferentes métodos empíricos, generando incertidumbre en la estimación de caudales pico y escorrentía superficial (Alamri et al., 2023; Sultan et al., 2022). Estas discrepancias se atribuyen principalmente a que gran parte de las ecuaciones fueron desarrolladas para condiciones hidrológicas específicas, generalmente en regiones de Estados Unidos y Europa, lo cual limita su transferencia directa a otras regiones sin un proceso de validación (Gericke & Smithers, 2014; Nam et al., 2024).

En regiones de montaña, como los Andes bolivianos, la complejidad hidrológica se incrementa debido a la presencia de fuertes gradientes altitudinales, escorrentía rápida, suelos poco desarrollados y precipitaciones de carácter estacional que favorecen la generación de crecidas súbitas (Mejía-Veintimilla et al., 2019).

En estos entornos, Sultan et al. (2022) destacan la necesidad de complementar las estimaciones

empíricas del TC con valores derivados del análisis de hidrogramas construidos a partir de datos observados de precipitación y caudal, con el fin de evaluar la coherencia hidrológica de los métodos aplicados.

En Bolivia, la disponibilidad de investigaciones hidrológicas en cuencas de alta montaña es limitada. Tal es el caso de la cuenca Kaynacas, ubicada en el departamento de Chuquisaca, la cual posee relevancia estratégica por su aporte al abastecimiento de agua en áreas rurales y urbanas de la ciudad de Sucre (Echeverría, 2024). No obstante, no se cuenta con estudios comparativos que permitan establecer estimaciones confiables del TC bajo condiciones hidrológicas locales.

En este contexto, el objetivo de este estudio es estimar el tiempo de concentración de la cuenca Kaynacas a partir de hidrogramas construidos con datos observados de precipitación y caudal, y compararlo con estimaciones obtenidas mediante seis métodos empíricos ampliamente utilizados en hidrología: Kirpich (1940), Giandotti (1934), Témez (1987), SCS (1972), Passini (1971) y Ventura (1993), con el fin de evaluar su aplicabilidad bajo condiciones fisiográficas andinas.

## ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica Kaynacas se localiza en la región andina del sur de Bolivia y se extiende entre los departamentos de Potosí y Chuquisaca, aproximadamente a 30 km al norte de la ciudad de Sucre.

La cuenca Kaynacas tiene una superficie de 82,82 km<sup>2</sup> y se distribuye administrativamente entre los municipios de Ravelo, Poroma y Sucre, integrando comunidades rurales como Cajamarca, Mamahuasi y Kaynacas (Echeverría, 2024). Presenta relevancia estratégica debido a la represa Kaynacas, destinada al riego agrícola, y al sistema de aducción Cajamarca-ELAPAS, que aporta al abastecimiento de agua potable para Sucre.

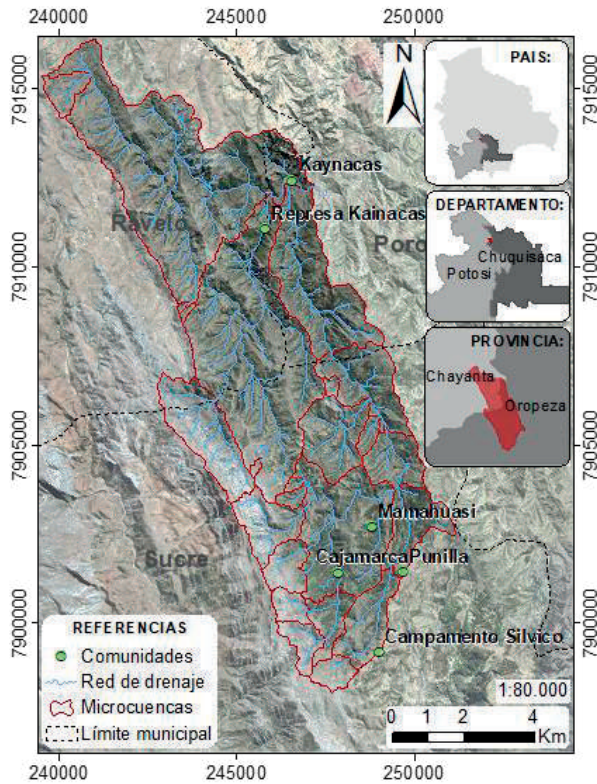


Figura 1. Área de estudio

Fisiográficamente, es una cuenca de alta montaña andina, con altitudes entre 2700 y 3853 m s.n.m., relieve escarpado y escorrentía superficial rápida. Su régimen hídrico es estacional pluvial, con lluvias concentradas entre noviembre y marzo, características que condicionan una respuesta hidrológica rápida y eventos de crecida súbita en época de lluvias (Echeverría, 2024).

## METODOLOGÍA

### Monitoreo de precipitación y caudal

La metodología del estudio se basa en un enfoque cuantitativo comparativo, orientado a estimar el tiempo de concentración ( $T_C$ ) de la cuenca de alta montaña Kaynacas (Bolivia) con la construcción de hidrogramas a partir de datos observados y mediante la aplicación de métodos empíricos ampliamente utilizados en hidrología superficial. Este enfoque sigue la estructura metodológica aplicada por Sultan et al. (2022) en su estudio comparativo de métodos empíricos de  $T_C$  y tiempo de rezago

( $T_L$ ) en cuencas tropicales de Etiopía, donde se evaluó el desempeño de diferentes ecuaciones hidrológicas utilizando parámetros derivados de la morfometría de cuencas.

En la cuenca Kaynacas se implementó un sistema automatizado de monitoreo hidrometeorológico para registrar las variaciones de precipitación y caudal superficial durante los eventos de lluvia. El sistema incluyó un pluviómetro automático Hobo RG3-M, con resolución de 0,2 mm y registros cada 5 minutos, y una estación meteorológica Davis configurada para medir temperatura, humedad, presión, radiación solar, y viento, con una frecuencia de 30 minutos.

Para el control hidrométrico se instalaron sensores automáticos de nivel Hobo, programados para registrar datos cada 10 minutos. Los niveles se convirtieron a caudales mediante aforos mensuales realizados y curvas de gasto actualizadas. Los eventos de lluvia y escorrentía se definieron con un intervalo mínimo de 30 minutos sin precipitación, considerando únicamente hidrogramas con un solo pico y recesión bien definida.

### Hidrogramas, cálculo de $T_C$ y $T_L$ con datos observados

La correspondencia temporal entre las series de precipitación y caudal permitió identificar los eventos lluvia - escorrentía, a partir de los cuales se estimó el  $T_C$ , correspondiente al intervalo entre el centroide de la lluvia efectiva y el punto de inflexión de la curva de recesión. El centroide de la lluvia efectiva ( $t_{wc}$ ) se calculó mediante la ecuación:

$$t_{wc} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times t_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

Donde:  $W_i$  representa la lluvia efectiva durante el intervalo  $i$ ,  $t_i$  el tiempo transcurrido y  $n$  el número total de registros en cada evento. La lluvia efectiva se obtuvo con el método del SCS.

La precipitación efectiva se calculó a partir de la pérdida inicial y de la función de tasa de pérdida basada en el método del índice  $\phi$  (phi-index method) (Simas y Hawkins, 1996; Dingman,

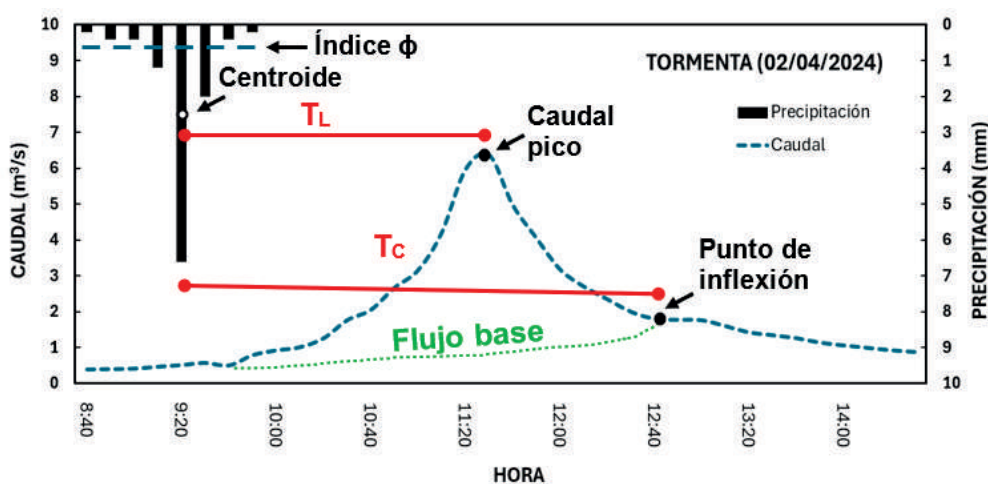
2002). El  $T_C$  y  $T_L$  se calcularon para cada evento de escorrentía individual, y sus medianas se utilizaron como medidas representativas del comportamiento hidrológico de la cuenca, minimizando el efecto de valores extremos (Figura 2).

### Métodos empíricos para la estimación del $T_C$

En coherencia con estudios que indican que el  $T_C$  depende de la forma y tamaño de la cuenca,

la pendiente, la longitud del cauce y las características de escorrentía (Gericke & Smithers, 2014; Michailidi et al., 2018), en este estudio se aplicaron cinco ecuaciones (Tabla 1) empíricas de uso frecuente en América Latina seleccionadas por su pertinencia en cuencas rurales y de topografía montañosa y por su utilidad cuando no se dispone de series de datos extensas o calibradas, permitiendo analizar la sensibilidad del  $T_C$  ante variaciones geomorfológicas y comparar resultados entre métodos (Sultan et al., 2022).

**Figura 2.** Esquema para describir el hietograma y su respuesta (hidrograma) y las definiciones de tiempo de retardo ( $T_L$ ) y tiempo de concentración ( $T_C$ ) y otros



Tal	Método		
	Kirpich	$T_C = 0.06628 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$	L= longitud del cauce principal (m) S= pendiente del cauce principal (m/m)
	Giandotti	$T_C = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$	A= área de la cuenca (km²) L= longitud del cauce principal (km) H= desnivel máximo en la cuenca (m)
	Témez	$T_C = 0.3 \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$	L= longitud del cauce principal (m) S= pendiente media de la cuenca (m/m)
	SCS	$T_C = 0.00203L^{0.8} \left[ \frac{\left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{(S)^{0.5}} \right]$	L= longitud del cauce principal (km) CN= Número de Curva SCS S= pendiente media de la cuenca (m/m)
	Passini	$T_C = \frac{[0.108 \cdot (A \cdot L)^{1/3}]}{S^{0.5}}$	A= área de la cuenca (km²) L= longitud del cauce principal (km) H= desnivel máximo en la cuenca (m) S= pendiente media de la cuenca (m/m)

**Nota.** El  $T_C$  para los métodos de Kirpich, Giandotti, Témez, y Passini se obtiene en horas, para el método del SCS el resultado se obtiene en minutos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores del tiempo de concentración ( $T_C$ ) y del tiempo de retardo ( $T_L$ ) obtenidos mediante los métodos empíricos (Kirpich, Giandotti, Témez, SCS y Passini) mostraron una dispersión moderada, con un  $T_C$  medio de 2,76 h y un  $T_L$  medio de 1,66 h (Tabla 2). Esta variabilidad es consistente con lo reportado por Fentaw et al. (2022) y Sultan et al. (2022) en cuencas montañosas y tropicales, donde las discrepancias entre métodos pueden alcanzar  $\pm 40\%$  debido a las diferencias en formulación y condiciones hidrológicas. En ambos estudios, los métodos basados solo en flujo superficial (Kirpich y Passini) tienden a subestimar el  $T_C$ , mientras que los que integran variables geomorfológicas (Giandotti y Témez) ofrecen valores más realistas.

En la cuenca Kaynacas, los valores observados de  $T_C$  derivados de eventos medidos (Tabla 3, Figura 3) presentan una media de 3,66 h, aproximadamente 30 % superior al promedio empírico, lo que indica que las ecuaciones tradicionales subrepresentan el tiempo real de respuesta hidrológica. Este comportamiento coincide con lo reportado por Nam et al. (2024) y Alamri et al. (2023), quienes atribuyen las diferencias a la influencia de la rugosidad superficial, la infiltración variable y los fuertes gradientes topográficos característicos de ambientes montañosos.

La relación promedio  $T_L \approx 0,61 \cdot T_C$  observada es congruente con la proporción  $T_L/T_C \approx 0,6$  documentada por Sultan et al. (2022), lo que demuestra una coherencia hidrológica entre cuencas tropicales y altoandinas y refuerza el uso del  $T_L$  como parámetro de verificación de consistencia. La mayor duración del  $T_C$  observado puede atribuirse a la alta infiltración inicial, la cobertura vegetal densa y la presencia de almacenamientos temporales, factores que retardan la escorrentía y amortiguan las crecidas. Este patrón coincide con los planteamientos de Beven (2020) y Michailidi et al. (2018), quienes sostienen que el  $T_C$  es una variable hidráulica dependiente de la intensidad

de lluvia y la humedad antecedente, más que una constante geométrica.

En conjunto, los resultados indican que la cuenca Kaynacas presenta una respuesta semi-rápida, con un  $T_C$  medio inferior a 4 h, típico de sistemas de montaña con cauces definidos.

No obstante, los métodos empíricos tienden a subestimar el  $T_C$  real, lo que puede generar sobreestimaciones de caudales pico si se aplican sin ajuste. Por ello, se recomienda la calibración local de ecuaciones como las de Kirpich y Témez, siguiendo el enfoque regional propuesto por Sultan et al. (2022) y Alamri et al. (2023), con el fin de desarrollar relaciones representativas para condiciones andinas.

**Tabla 2.** Resultados de  $T_C$  y  $T_L$  obtenidos por métodos empíricos seleccionados

Método	$T_C$ (h)	$T_L$ (h)
Kirpich	2,31	1,39
Giandotti	2,56	1,54
Témez	3,55	2,13
SCS	3,35	2,01
Pasisni	2,03	1,22
Media	2,76	1,66
Mediana	2,56	1,54

**Tabla 3.** Resultados de  $T_C$  y  $T_L$  con datos observados de eventos

Fecha Evento	$T_C$ (h)	$T_L$ (h)
29/12/2023	4,00	2,67
30/12/2023	4,80	2,67
27/1/2024	2,67	1,17
8/2/2024	3,67	2,67
13/2/2024	4,00	2,83
7/3/2024	3,17	2,00
2/2/2024	3,33	2,17
Media	3,66	2,31
Mediana	3,67	2,67

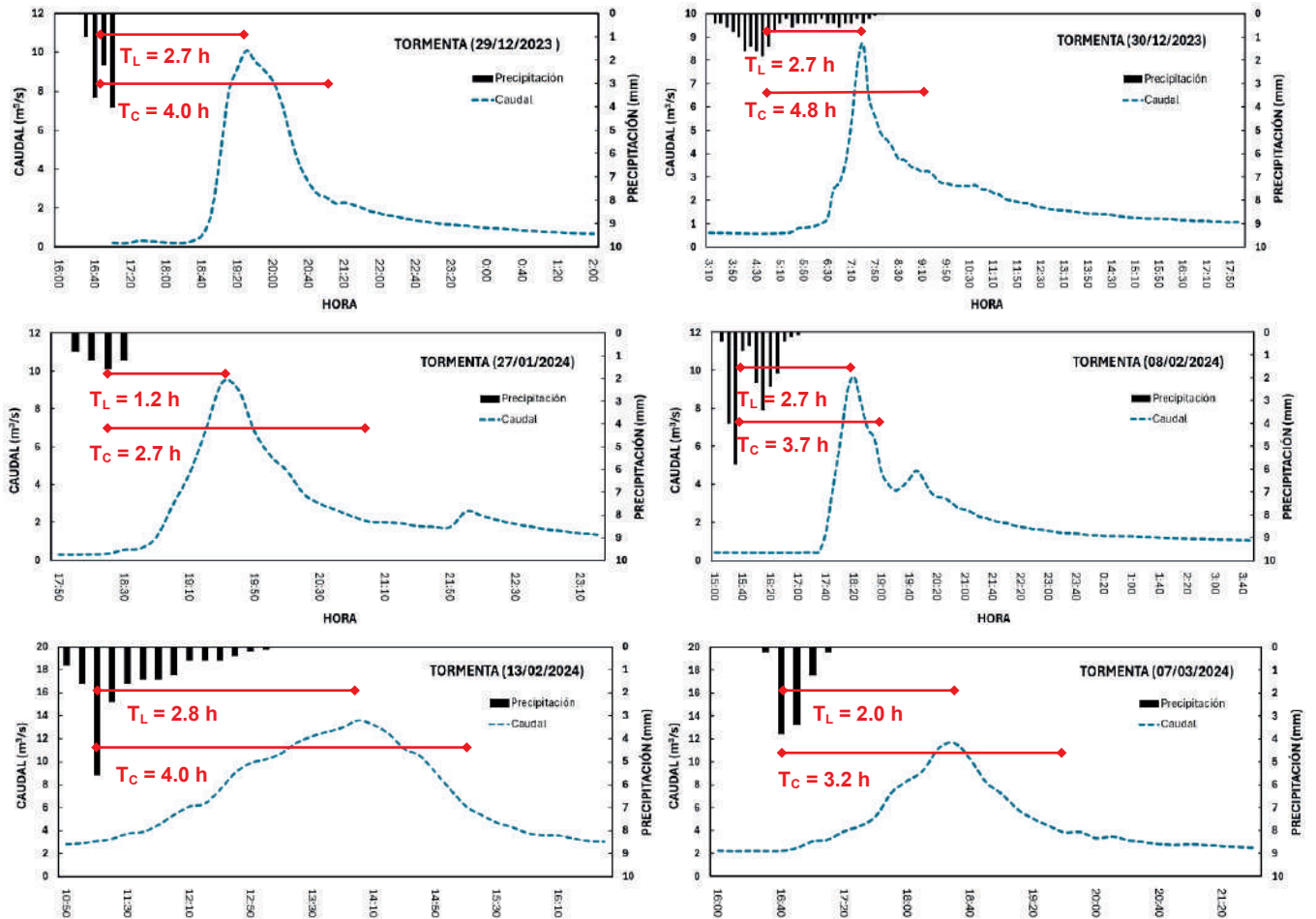


Figura 3. Eventos de precipitación – escorrentía para el año hidrológico 2023 – 2024, en los cuales se indica el tiempo de retardo ( $T_L$ ) y el tiempo de concentración ( $T_C$ ) para la cuenca

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la cuenca de alta montaña Kaynacas demuestran que la estimación del tiempo de concentración ( $T_C$ ) mediante métodos empíricos presenta una variabilidad moderada entre ecuaciones, con valores promedio inferiores a los observados en campo. Esta diferencia confirma que las fórmulas empíricas desarrolladas para regiones templadas o de baja pendiente no reproducen adecuadamente las condiciones hidrológicas de las cuencas altoandinas, caracterizadas por gradientes topográficos pronunciadas, suelos de alta infiltración inicial y cobertura vegetal heterogénea.

El  $T_C$  medio observado de 3,66 h resultó aproximadamente 30 % superior al valor promedio obtenido con los métodos empíricos (2,76 h), lo que sugiere una subestimación sistemática del tiempo real de respuesta hidrológica. Esta tendencia coincide con lo reportado por Sultan et al. (2022) en cuencas tropicales de Etiopía y por Alamri et al. (2023) en ambientes áridos, evidenciando que la validez de las ecuaciones empíricas depende fuertemente de la región hidrológica y las condiciones climáticas locales.

La relación  $T_L/T_C \approx 0,6$ , observada tanto en los resultados de Kaynacas como en los estudios comparativos de Sultan et al. (2022), confirma la consistencia física del desfase entre la lluvia

efectiva y la escorrentía directa, consolidándose como un parámetro de validación útil para la modelación hidrológica en cuencas montañosas. Asimismo, los métodos que combinan componentes de flujo superficial y de canal (Giandotti y Témez) mostraron una mayor coherencia con los valores observados, mientras que las fórmulas basadas exclusivamente en flujo superficial (Kirpich y Passini) tendieron a subestimar el Tc.

En términos aplicados, los resultados ponen de manifiesto la necesidad de ajustar regionalmente los coeficientes de las ecuaciones empíricas utilizadas, especialmente las de Kirpich y Témez, siguiendo el enfoque de calibración local propuesto por Sultan et al. (2022). Este ajuste permitiría mejorar la precisión de los cálculos de Tc y, por consiguiente, reducir la incertidumbre en la estimación de caudales pico y en el dimensionamiento de obras hidráulicas en regiones andinas.

Este estudio contribuye a la comprensión del comportamiento hidrológico de las cuencas altoandinas bolivianas y proporciona una base metodológica para el desarrollo de relaciones Tc–geomorfología calibradas localmente, que favorezcan la transferencia de conocimiento hacia otros sistemas de montaña con condiciones fisiográficas similares.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alamri, N., Afolabi, K., Ewea, H., & Elfeki, A. (2023). Evaluation of the time of concentration models for enhanced peak flood estimation in arid regions. *Sustainability*, 15(3), 1987. <https://doi.org/10.3390/su15031987>
- Beven, K. (2020). A history of the concept of time of concentration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), 2655–2670. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2655-2020>
- Costabile, P., Barbero, G., Nagy, E., Négyesi, K., Petaccia, G., & Costanzo, C. (2024). Predictive capabilities, robustness and limitations of two event-based approaches for lag time estimation in heterogeneous watersheds. *Journal of Hydrology*, 642, 131814. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131814>
- Dingman, S. L. (2002). *Physical Hydrology* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Echeverría Tapia, J. C. (2024). *Modelación hidrológica de la cuenca de alta montaña Kaynacas bajo escenarios de cambio climático* [Trabajo de grado, Universidad del Valle].
- Fentaw, M., Meshesha, D. T., Tsunekawa, A., Sultan, D., & Tsubo, M. (2022). Analysis of watershed response to rainfall variability using observed data in the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrology Research*, 53(5), 619–636. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.020>
- Gericke, O. J., & Smithers, J. C. (2014). Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. *Hydrological Sciences Journal*, 59(11), 1935–1971. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866712>
- Giandotti, M. (1934). Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. *Annali dei Lavori Pubblici*, 72, 449–479.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.
- McCuen, R. H. (2009). Uncertainty analyses of watershed time parameters. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(5), 490–498. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000020](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000020)
- Mejía-Veintimilla, D., Ochoa-Cueva, P., Samaniego-Rojas, N., Félix, R., Arteaga, J., Crespo, P., & Fries, A. (2019). River discharge simulation in the high Andes of Southern Ecuador using high-resolution radar observations and meteorological station data. *Remote Sensing*, 11(23), 2804. <https://doi.org/10.3390/rs11232804>
- Michailidi, E. M., Antoniadis, S., Koukouvinos, A., Bacchi, B., & Efstratiadis, A. (2018). Timing the time of concentration: Shedding light on a paradox. *Hydrological Sciences Journal*, 63(5), 721–740. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1450985>
- Nam, S., Lim, H., Choi, B., Li, Q., Moon, H., & Choi, H. T. (2024). Characteristics and estimation of the time of concentration for small forested catchments in steep mountainous terrain. *Forests*, 15(1), 186. <https://doi.org/10.3390/f15010186>
- Passini, F. (1971). *Manuale di Idrologia Tecnica*. Edizioni Cremonese.
- Simas, M., & Hawkins, R. H. (1996). Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))
- Soil Conservation Service (SCS). (1972). *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. U.S. Department of Agriculture.
- Sultan, D., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Haregeweyn, N., Adgo, E., Meshesha, D. T., Fenta, A. A., & Ebabu, K. (2022). Evaluation of lag time and time of concentration estimation methods in small tropical watersheds in Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 40, 101025. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101025>
- Témez, J. R. (1987). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. CEDEX – Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.



## 10 AÑOS CONSTRUYENDO CIENCIA Y LIDERAZGO: LA SOCIEDAD CIENTÍFICA DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA CIVIL Y SU IMPACTO EN LA INGENIERÍA

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.

Desde su fundación, la SCEIC se ha consolidado como un espacio de encuentro para jóvenes comprometidos con la excelencia académica y el desarrollo profesional, impulsando el espíritu investigativo, la colaboración interdisciplinaria y el liderazgo estudiantil.

Su propósito no se limita únicamente a fomentar la investigación, sino también a **motivar a las nuevas generaciones de ingenieros civiles a desarrollar pensamiento crítico, creatividad y vocación científica**. A través de sus diversas iniciativas, la sociedad promueve un entorno donde la curiosidad, la cooperación y la ética profesional se convierten en pilares fundamentales.

Durante estos **10 años de historia**, la SCEIC ha demostrado ser un referente de crecimiento constante. En cada gestión, la sociedad ha fortalecido su identidad, ampliado sus horizontes y dejado huella en el ámbito académico local e internacional. Su trabajo, guiado por la pasión y el compromiso, ha permitido consolidar un espacio donde los estudiantes aprenden, comparten y transforman el conocimiento.

Más que una organización, la SCEIC es una **comunidad de aprendizaje**, un espacio donde la ciencia y la ingeniería se combinan con la visión humana de construir un futuro sostenible. Hoy, al celebrar una década de logros, reafirma su compromiso con la excelencia, la innovación y la formación integral de sus miembros.



**Fig. 1** Miembros actuales SCEIC

Hoy, al celebrar una década de logros, reafirma su compromiso con la excelencia, la innovación y la formación integral de sus miembros.

## UNA HISTORIA DE CRECIMIENTO Y ORGANIZACIÓN

A lo largo de esta década, la SCEIC ha evolucionado significativamente, manteniendo siempre su esencia: promover la investigación científica y el desarrollo integral de los estudiantes de ingeniería civil. Actualmente, cuenta con aproximadamente 60 integrantes, cada uno de ellos comprometido con la misión de generar conocimiento y fortalecer la imagen académica de la carrera.

Su estructura organizativa refleja un modelo de gestión colaborativa y transparente, encabezado por una directiva conformada por los siguientes cargos:

- Presidencia
- Vicepresidencia
- Secretaría
- Tesorería
- Encargaduría de Ética
- Encargaduría de Publicidad
- Área Académica
- Área Científica
- Relaciones Públicas

Cada una de estas áreas cumple un rol esencial en el funcionamiento institucional. Desde la planificación de eventos hasta la coordinación de investigaciones, todos los miembros aportan sus habilidades para asegurar el cumplimiento de los objetivos de la sociedad.



Fig. 2. Mesa directiva SCEIC

## MISIÓN Y VISIÓN

### Misión:

Fomentar el desarrollo académico y profesional de los estudiantes de ingeniería civil a través de la investigación.

### Visión:

Proyectarnos como una sociedad líder reconocida por nuestras contribuciones científicas, la organización de eventos de alto nivel y el desarrollo integral de nuestros miembros.

## ACTIVIDADES ACADÉMICAS, CIENTÍFICAS Y DE FORMACIÓN

La SCEIC se ha caracterizado por su intensa labor en el ámbito académico y científico. Cada año, organiza y participa en una amplia variedad de actividades que promueven el aprendizaje, la innovación y el trabajo en equipo.

Entre las más destacadas se encuentran los talleres de capacitación, donde los estudiantes aprenden sobre diseño estructural, nuevas normativas y programas especializados. Asimismo, la sociedad impulsa talleres de redacción científica y Scopus, que preparan a los miembros para publicar en revistas indexadas y difundir sus resultados de investigación.



Fig. 3 Feria Científica

El compromiso con la formación se ve reflejado en los ciclos de conferencias, en los que se abordan temas técnicos, ambientales y sociales, abriendo espacios de debate sobre los retos actuales de la ingeniería civil. Estas instancias han permitido establecer vínculos con docentes, investigadores y profesionales reconocidos, fortaleciendo la relación entre la teoría y la práctica.

## CIVILCON: EL CONGRESO ESTUDIANTIL MÁS REPRESENTATIVO

Uno de los mayores logros de la SCEIC es la organización del CIVILCON, un congreso estudiantil de alto nivel académico que se ha convertido en una tradición dentro de la facultad.

El evento reúne a estudiantes, docentes y profesionales de todo el país, creando un espacio de intercambio de conocimientos, competencias técnicas y experiencias personales.

Durante el CIVILCON, se desarrollan diversas actividades que combinan el rigor científico con la creatividad y la integración, entre las cuales destacan:

- **Concurso de Ponencias:** donde los participantes presentan investigaciones y proyectos, promoviendo la divulgación científica estudiantil.



Fig. 4 Concurso de ponencias CIVILCON 2024

- **Torneo de Conocimientos:** una competencia que desafía el intelecto y pone a prueba la preparación de los estudiantes mediante preguntas técnicas, cálculos y casos prácticos.
- **Puentes de Palitos y Fideos:** pruebas que evalúan la **creatividad estructural, la precisión y la destreza en el diseño**, desafiando a los participantes a construir modelos que combinen resistencia, estética e innovación.



Fig. 5 Concurso de puentes de palitos de helado

- **Rotura de Hormigones:** actividad experimental que permite analizar la resistencia de materiales y la importancia del control de calidad en la construcción.
- **Campeonato Relámpago de Futsal:** promoviendo la integración y el compañerismo fuera del entorno académico.

El CIVILCON no solo impulsa el aprendizaje técnico, sino también el espíritu competitivo y la unión entre estudiantes. Se ha convertido en una plataforma donde nacen ideas, proyectos y amistades que fortalecen la identidad de los futuros ingenieros civiles.

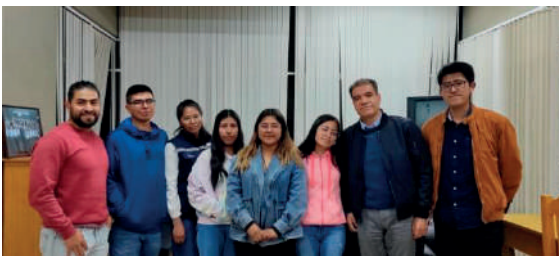


Fig. 6 CIVILCON 2024

### VIERNES DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS Y CAFÉ: UN ESPACIO DE INSPIRACIÓN

El programa “**Viernes de artículos científicos y café**” es una de las actividades más queridas por los miembros. Se trata de encuentros informales en los que estudiantes conversan con docentes e investigadores invitados, compartiendo experiencias sobre la carrera, la investigación y la vida universitaria. Durante el último ciclo, participaron figuras destacadas en nuestro medio como el **Ing. Boris Bellido**, el **Lic. Humberto Mamani** y la **Ing. Danitza Maygua**, quienes brindaron charlas inspiradoras, despertando en los estudiantes la motivación por seguir aprendiendo.

Estos espacios han fortalecido la comunidad científica y humana dentro de la facultad, fomentando la confianza, el respeto y el aprendizaje colaborativo.



**Fig. 7** Viernes de artículos científicos y café con expertos en investigación científica

### INVESTIGACIONES DE IMPACTO

La investigación es el corazón de la SCEIC. A lo largo de los años, se han desarrollado proyectos que abordan problemáticas actuales de la ingeniería civil, como la sostenibilidad en materiales, la eficiencia estructural y el impacto ambiental de la construcción. Varios de estos estudios se han presentado en revistas científicas como Ingenium y Scopus, y han sido defendidos en congresos nacionales e internacionales.

Actualmente, la sociedad impulsa la expansión de líneas de investigación, promoviendo la participación de nuevos estudiantes y el desarrollo de trabajos que aporten soluciones innovadoras. El objetivo es consolidar una comunidad

científica sólida, capaz de generar conocimiento útil para la sociedad y contribuir al progreso de la ingeniería Bolivia.

### CLUB DE LECTURA: CIENCIA, CULTURA Y PENSAMIENTO CRÍTICO

El Club de Lectura es una de las iniciativas más singulares de la SCEIC. Abierto a estudiantes de todas las carreras, promueve la lectura como una herramienta de crecimiento personal y profesional. En este espacio, se comparten libros de diversos géneros —científicos, literarios, históricos y filosóficos— que amplían la visión del mundo de los participantes y estimulan el pensamiento crítico.

Además, el club fortalece la comunicación, la empatía y el trabajo en grupo, permitiendo que los ingenieros en formación desarrollen una sensibilidad más amplia y humana frente a su entorno. Así, se demuestra que la ingeniería también puede ser un puente entre la ciencia y la cultura.



**Fig. 8** Club de Lectura REPRESENTACIÓN INTERNACIONAL Y NETWORKING CIENTÍFICO

La SCEIC pertenece a la ASEIC (Asociación de Sociedades Científicas de Estudiantes de Ingeniería Civil), lo que le otorga una representación activa en escenarios internacionales.

Sus miembros han participado en congresos, seminarios y concursos en Argentina, Perú, México, Panamá, Colombia, Chile y Paraguay, compartiendo experiencias y destacando por la calidad de sus investigaciones y ponencias.

Estas experiencias han permitido fortalecer el networking académico, ampliar la visión sobre la ingeniería civil en distintos contextos y comprender cómo los desafíos estructurales, ambientales y sociales varían según la región. La representación internacional también ha sido una fuente de orgullo para la facultad, posicionando a la SCEIC como una embajadora de la excelencia académica.



**Fig. 9** CONEIC Rosario Argentina 2024



**Fig. 10** CONEIC Huaraz Perú 2025



**Fig. 11** CONEIC Colombia 2024

perseverancia pueden transformar la educación.

Cada proyecto, cada investigación y cada actividad reflejan el compromiso de los estudiantes por ir más allá del aula, por construir un legado de conocimiento, liderazgo y humanidad.

La SCEIC continúa creciendo, adaptándose a los cambios y enfrentando nuevos desafíos con la misma energía que la vio nacer. Su historia es una muestra de que los grandes logros nacen de la unión, del esfuerzo colectivo y del amor por la ingeniería civil. Porque más allá de levantar estructuras, los miembros de la SCEIC están construyendo algo aún más grande: una comunidad que inspira, enseña y deja huella.

#### **CONCLUSIÓN: UNA DÉCADA CONSTRUYENDO CONOCIMIENTO**

Durante estos diez años, la Sociedad Científica de Estudiantes de Ingeniería Civil ha demostrado que la pasión por la ciencia y la

