

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

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



DIRECTORIO DE LA REVISTA

Alfredo Arancibia Chávez, MSc.
Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

Juan José Rosales Valda, MSc.
Director de la Carrera de Ingeniería Civil

COMITÉ TÉCNICO

Juan Carlos Rojas Vidovic, PhD.
Ronald Zapata Vásquez, MSc.
Corina Hernández Oña, MSc.
Guido Ángel Frías Cordero, Ing.
Grover Urquizo Paco, Ing.
Alfredo López Marca, Ing.
Miguel Ángel Fernández León, Ing.

MISIÓN

Lostrar prestigio y reconocimiento regional y nacional por su calidad en los procesos de enseñanza-aprendizaje, investigación e interacción social, participando con protagonismo y liderazgo moral, científico y tecnológico en el desarrollo departamental y nacional, aportando con profesionales altamente capacitados en: proyección, cálculo, diseño, dirección, supervisión, construcción y mantenimiento de obras civiles, orientadas a la solución de problemas urbanos y rurales, que contribuyan al desarrollo integral de la nación y el mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes.

VISIÓN

Formar profesionales de reconocida calidad moral, científica y tecnológica, con actualidad y competencia, capaces de utilizar eficientemente los recursos humanos y materiales de la región y el país para contribuir con creatividad a la solución de problemas de saneamiento básico, infraestructura habitacional, comunicación vial, deportiva, educación, salud, aprovechamiento sostenido de recursos naturales, con pertinencia y responsabilidad social.

Contenido

PRESENTACIÓN	i
PRESENTACIÓN	ii
Auditoría de obras civiles, el control posterior en todas las obras públicas construidas (perfil de tesis, diplomado en evaluación de proyectos).....	7
Efecto de la succión matricial en la distribución de esfuerzos verticales generados por el paso de un vehículo en una arena limosa bajo diferentes condiciones ambientales Artículo presentado en la 3ra Conferencia Panamericana en suelos No Saturados (Río de Janeiro, Brasil).....	15
Informe técnico sobre el análisis tensional e importancia estructural del riego de liga	23
El aporte y el papel del sector de la construcción a los ODS y la agenda 2030 en Bolivia	29
Efecto de la tasa de carga isotrópica en ensayos triaxiales no saturados.....	37
Tecnología dhs 3g (downflow hanging sponge) como etapa secundaria para tratamiento de aguas residuales.....	45
Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales de Sucre	55
La demostración rigurosa de la fórmula $\pi(x)$ y la criba de Beimar Wilfredo López Subia	67
Variabilidad inherente en la determinación del esfuerzo de preconsolidación de suelos mediante ensayos edométricos convencionales.....	79
Validación de la precipitación estimada en modelos climáticos globales del CMIP6 para la Cuenca Tupiza	89



Presentación

Con todo agrado, como Decano de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, me permito presentar a ustedes, el segundo número de la REVISTA INGENIUM, la misma que fue elaborada por varios docentes de la Facultad, así como por profesionales de Ingeniería Civil, deseosos de hacer investigación a pesar de las grandes limitaciones que existen en nuestro medio.

Debo resaltar el esfuerzo, compromiso y sobre todo el amor hacia la investigación que puso cada uno de ellos en los artículos que se presentan.

Todos los trabajos presentados muestran un alto contenido científico y tocan aspectos relacionados con problemas actuales, mismos que deben ser resueltos por los profesionistas de ingeniería civil.

El compromiso adquirido cuando se presentaba el primer número de la Revista ha sido cumplido y al hacerlo nos sentimos complacidos y agradecidos a Dios que permitió este logro tan significativo en la historia de la Facultad.

Las actuales Autoridades Facultativas y de Carrera están seguras de poder lograr durante el siguiente año nuevas investigaciones considerando las inversiones que realiza la Facultad en la adquisición de equipos de laboratorio.

Atiempo de reiterar las felicitaciones a todos los organizadores de la Revista, a los miembros de la Comisión de Revisión y a los ingenieros que presentaron sus trabajos, les agradezco por su participación.

MS.c. Ing. Alfredo Arancibia Chávez
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 segundo número de la Revista “Ingenium”, la cual contiene artículos científicos actualizados relacionados con la apasionante área de “Ingeniería Civil”.

La Universidad que nos cobija, tiene la obligación de motivar a los docentes y estudiantes para que incursionen en el campo la investigación científica y la innovación tecnológica, con el propósito de estar acorde con los desafíos que plantea el vertiginoso avance de la ciencia y la tecnología en el mundo globalizado en el que vivimos y es lo que hizo la Carrera de Ingeniería Civil, porque en la revista se encuentran plasmados artículos inéditos que fueron elaborados por notables docentes de la Facultad y profesionales de nuestro medio y de otras Universidades del Sistema Nacional de Universidades.

Es por ello que con honda satisfacción presento a consideración de los lectores este nuevo material, resaltando la relevante contribución que representa en el ámbito del quehacer científico de San Francisco Xavier de Chuquisaca.

El Segundo número del material bibliográfico que presentamos no hubiera sido posible sin el decidido y comprometido concurso del Comité Técnico conformado por los colegas docentes Ing. Corina Hernández Oña, Ing. Guido Ángel Frías Cordero, Ing. Alfredo López Marca, Ing. Grover Urquizo Paco, Ing. Miguel Ángel Fernández León, Ing. Juan Carlos Rojas Vidovic e Ing. Ronald Zapata Vásquez. Asimismo, un agradecimiento especial a la primera autoridad de la Facultad de Ingeniería Civil M.Sc. Ing. Alfredo Arancibia Chávez por viabilizar la publicación de la Revista.

Resalto la cooperación de la Sociedad de Ingenieros de Bolivia departamental Chuquisaca y el Colegio de Ingenieros Civiles de Chuquisaca que colaboraron económicamente, para hacer realidad la publicación de la revista.

El trabajo comprometido y aunado de todos los que conformamos la Facultad de Ingeniería Civil siempre nos permitirá el logro de los objetivos académicos y la cualificación del proceso Enseñanza – Aprendizaje en nuestra querida Unidad Académica. 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 se deleiten y enriquezcan sus conocimientos con la calidad de cada artículo presentado en el material bibliográfico que tienen entre sus manos.

MS.c. Ing. Juan José Rosales Valda
DIRECTOR CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
U.S.F.X.CH.



Auditoría de obras civiles, el control posterior en todas las obras públicas construidas (perfil de tesis, diplomado en evaluación de proyectos)

Frías Guido Ángel

^b Docente de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia.
E-mail: guidofrias@gmail.com

RESUMEN

El control posterior en obras civiles es una fase importante para la verificación de la construcción de las obras; principalmente el cumplimiento contractual en términos de Calidad, Cantidad y Tiempo de Ejecución. En Bolivia, las Entidades Públicas, en el marco de sus competencias que les han sido conferidas por las disposiciones legales vigentes, ejecutan obras públicas para satisfacer al colectivo social. Estas son principalmente: Gobiernos Municipales, Gobernaciones, Empresas Estratégicas, Empresas de Servicios, ONGs, etc.

Las auditorías especiales solo se basan estrictamente en el aspecto formal; no son suficientes para emitir resultados definitivos frente a las inversiones del estado en relación a las obras públicas. En la actualidad, muy pocas obras ejecutadas son verificadas posteriormente, no se aplican la post evaluación y mucho menos se implementan las normas de auditorías en estas obras, en la mayoría de los casos. La realización de la auditoría especial de ingresos y egresos realizados por los auditores financieros que se basan estrictamente en el aspecto formal y la auditoría de proyectos de inversión pública, no son suficientes técnicamente para emitir un resultado definitivo que refleje la calidad de construcción de todas las obras que se construyen en nuestro país.

Las programaciones anuales de auditorías tanto por las unidades de auditoría interna de las entidades públicas, como por la Contraloría General del Estado abarcan muy pocas obras públicas.

Es común encontrar en nuestro país obras mal ejecutadas, deficientes, con diseños defectuosos, Proyectos elefantes blancos, obras inconclusas, sin ninguna observación formal técnica. El descontento de la población es el único reflejo de una obra ejecutada sin control. Las obras mal ejecutadas, provocan daños económicos al Estado, produciéndose además un gran perjuicio a la sociedad a la que debería beneficiársela con obras de buena calidad.

El presente trabajo de investigación; es una propuesta de incluir en las Normas Bolivianas, la auditoría técnica a todas las obras publicas construidas.

Palabras clave: Control Posterior, examen o auditoria, en el caso de obras también se denomina auditoría técnica

ABSTRACT

The subsequent control in civil works is an important phase for the verification of the construction of the works; mainly contractual compliance in terms of Quality, Quantity and Execution Time. In Bolivia, Public Entities, within the framework of their powers that have been conferred on them by current legal provisions, execute public works to satisfy the social collective. These are mainly: Municipal Governments, Governments, Strategic Companies, Service Companies, NGOs, etc.

The special audits are only based strictly on the formal aspect, they are not enough to issue definitive results regarding the state's investments in relation to public works. Currently, very few executed works are subsequently verified, post evaluation is not applied, and much less are auditing standards implemented in these works, in most cases. The performance of the special audit of income and expenses carried out by the financial auditors that are strictly based on the formal aspect and the audit of public investment projects, are not technically sufficient to issue a definitive result that reflects the quality of construction of all the works that are built in our country.

The annual audit schedules both by the internal audit units of public entities and by the State Comptroller General's Office cover very few public works.

It is common to find in our country badly executed, deficient works, with defective designs, white elephant projects, unfinished works, without any formal technical observation. The discontent of the population is the only reflection of a work carried out without control. Badly executed works cause economic damage to the State, also producing great damage to society, which should benefit from good quality works.

The present research work; It is a proposal to include in the Bolivian Standards, the technical audit of all the public works built.

Key words: Subsequent control, examination or audit, in the case of works it is also called technical audit

INTRODUCCIÓN

La ley 1178 (Ley de Administración y Control Gubernamentales); es el instrumento principal para administrar y controlar los recursos del Estado Plurinacional de Bolivia, vigente desde el 20 de julio de 1990.

Esta ley sistémica está constituida por ocho sistemas: Sistema de Programación de Operaciones, Sistema de Presupuesto (PLANIFICACION); Sistema de Organización Administrativa (ORGANIZAR), Sistema de Administración de Personal, Sistema de Administración de Bienes y Servicios, Sistema de Crédito Público, Sistema de Contabilidad Integrada (EJECUTAR); Sistema de Control Gubernamental (CONTROL)

El control en Bolivia, está constituido por el Control Previo y Control Posterior. En el caso de obras públicas el Control Previo se efectúa principalmente por el Supervisor de Obras, en la etapa de ejecución de la obra.

El Control Posterior se desarrolla por las Unidades de Auditoría Interna de las Entidades Públicas y la Contraloría General del Estado. Para efectuar los exámenes posteriores, se cuenta con las Normas de Auditoría Gubernamental: 1) Norma de Auditoría Gubernamental, 2) Norma de Auditoría Financiera, 3) Norma de Auditoría de financiera, 4) Norma de Auditoría Operacional, 5) Norma de Auditoría Ambiental, 6) Norma de Auditoría Especial, 7) Norma de Auditoría de Proyectos de Inversión Pública, 7) Norma de Auditoría de Tecnología de la Información y Comunicación, 8) Normas para el ejercicio de Auditoría Interna.

DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

En Bolivia, las Entidades Públicas, en el marco de sus competencias que les han sido conferidas por las disposiciones legales vigentes, ejecutan obras públicas para satisfacer al colectivo social. Estas son principalmente: Gobiernos Municipales, Gobernaciones, Empresas Estratégicas, Empresas de Servicios, ONGs, etc.

Las auditorías especiales solo se basan estrictamente en el aspecto formal, no son suficientes para emitir resultados definitivos frente a las inversiones del estado en relación a las obras públicas.

En la actualidad, muy pocas obras ejecutadas son verificadas posteriormente, no se aplican la post evaluación y mucho menos se implementan las normas de auditorías en estas obras, en la mayoría de los casos. La realización de la auditoría especial de ingresos y egresos realizados por los auditores financieros que se basan estrictamente en el aspecto formal y la auditoría de proyectos de inversión pública, no son suficientes técnicamente para emitir un resultado definitivo que refleje la calidad de

construcción de todas las obras que se construyen en nuestro país.

Las programaciones anuales de auditorías tanto por las unidades de auditoría interna de las entidades públicas, como por la Contraloría General del Estado abarcan muy pocas obras públicas.

Es común encontrar en nuestro país obras mal ejecutadas, deficientes, con diseños defectuosos, Proyectos elefantes blancos, obras inconclusas, sin ninguna observación formal técnica. El descontento de la población es el único reflejo de una obra ejecutada sin control. Las obras mal ejecutadas, provocan daños económicos al Estado, produciéndose además un gran perjuicio a la sociedad a la que debería beneficiársela con obras de buena calidad.

¿De qué manera, se puede controlar de mejor forma las obras públicas en Bolivia?

Justificación

Las Entidades Públicas del Estado Plurinacional de Bolivia, en cumplimiento de la Ley 1178 de Fiscalización y Control Gubernamental, elaboran el Programa Operativo Anual (POA), estableciendo en ella los programas a ejecutarse en cada gestión; una de las partidas está referida a la ejecución de obras públicas, para cuyo efecto, el Estado se ve en la obligación de erogar gastos económicos en grandes cantidades o volúmenes. Con tales antecedentes ejecutan la obra, y una vez concluida, los documentos de descargo se sujetan al procedimiento de Auditoría Especial de Ingresos y Egresos y/o auditorías financieras de gestión.

No se efectúa la Auditoría Técnica que sirve de base para verificar la existencia física y si fue ejecutada conforme a diseño de la obra. Las obras públicas al no ser controladas posteriormente son un aliciente para la corrupción; motivo por el cual existen obras mal construidas, es más, a veces ni existen.

En las normas de Auditoría Gubernamental Vigentes, no existe la Norma Técnica de Control Posterior de Obras Públicas.

De ahí que el Estado se ve en la necesidad y obligación de emitir una normativa jurídica específica que obligue a las entidades públicas en Bolivia a realizar la auditoría técnica en la ejecución de obras públicas, de esa manera brindar seguridad a la sociedad respecto a la inversión de recursos económicos que ellos aportan al Estado en calidad de tributos fiscales.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una norma técnica, para la implementación del control posterior en la ejecución de obras públicas en las entidades públicas del Estado Plurinacional de Bolivia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Contribuir en las Normas de Auditoría Gubernamental para incrementar la cantidad de obras públicas que se auditen anualmente en Bolivia.
- Identificar el ordenamiento jurídico formal vigente en el país característico de la ejecución de auditorías de obras públicas.
- Proponer un Sistema de Verificación Técnica en obras ejecutadas, como insumo principal para una auditoría TÉCNICA DE OBRAS PÚBLICAS.

FORMULACIÓN DEL PERFIL DE TESIS

La condición o situación actual en nuestro país, respecto al control posterior, no es tomada en cuenta para una mejor gestión y para garantizar el buen uso de los recursos públicos que se destinan a la ejecución de obras públicas. En Bolivia el control posterior se realiza a través de la Contraloría General del Estado, llamado control externo posterior y por las Unidades de Auditoría Interna de las Entidades Públicas, denominado control interno posterior.

El control, una de las etapas principales en la ejecución de proyectos, enmarcados en nuestra normativa vigente se realiza como control previo y control posterior. Análogamente en la ejecución de obras públicas se realiza la supervisión de obras en la etapa de ejecución de la obra; correspondiendo a un control previo. El control posterior, en el caso de obras públicas es parte de una auditoría de proyectos de inversión pública o auditorías especiales; supeditados a una programación anual de verificación de ingresos y egresos en las entidades públicas. La Contraloría General del Estado y las Unidades de Auditoría Interna, no programan un examen posterior a todas las obras públicas ejecutadas.

En el país y en el departamento de Chuquisaca, no existe un contento general de la población beneficiada respecto a la calidad de las obras ejecutadas; se denuncian obras que no cumplen con el objetivo para que han sido construidas, no reflejan necesidades, son muy sobredimensionadas, en algunos casos no existen. El control posterior no realizado a todas las obras públicas, es una falencia que contribuye a un manejo discrecional de los

recursos públicos por funcionarios en concomitancia con supervisores, empresas constructoras y/o contratistas de obras.

Las Normas de Auditoría Gubernamental, emitidas por la Contraloría General del Estado no son específicas y no abarcan el control posterior a todas las obras públicas ejecutadas por las entidades públicas.

En tal sentido se propone introducir en las normas de auditoría gubernamental, el procedimiento técnico para el control posterior de obras públicas

Formulación de la Hipótesis

En Bolivia en la gestión 2019 se auditaron ciento un obras públicas de dos mil setecientos setenta y nueve construidas, como parte de un informe de auditoría especial o auditoría de proyectos de inversión pública, no se realiza una auditoría de obras públicas, por cuanto no existe en las normas de auditoría gubernamental esta denominación.¹ Por tanto el control posterior solo abarcó un 3,6% de obras construidas.

En un contrato de obras públicas, se tienen tres aspectos fundamentales que cumplir contractualmente: Cantidad, Calidad y Tiempo de Ejecución. Estos tres aspectos fundamentales de un contrato de obras son controlados por el Supervisor de Obras, en la etapa de ejecución. Para este control se aplican técnicas y reglamentos impuestos por el control previo. El control como actividad tiene dos etapas una de ellas denominada Control Previo y la otra Control Posterior; el control previo efectuado por la entidad ejecutora a través del Supervisor de Obras en las construcciones de obras públicas; el control posterior, denominado actualmente como control interno posterior y control externo posterior, realizadas por las unidades de auditoría interna de las entidades públicas y por la Contraloría General del Estado respectivamente. La insuficiente cantidad de profesionales en estas entidades hace imposible efectuar oportunamente la verificación de la ejecución de obras públicas, se suma a esta imposibilidad, la no inclusión en las Normas de Auditoría Gubernamental.

Si se logra instituir en el país la obligatoriedad de efectuar el control posterior en las obras públicas, se evitarían muchos efectos que conllevan a la ausencia del control posterior en la mayoría de las obras; se reduciría la corrupción y se mejoraría la calidad de las obras. Además, se habla muy poco de los otros aspectos fundamentales contractualmente, que son la cantidad y el tiempo de ejecución. Casi en todas las obras se incrementa el costo referencial, se modifica el monto de contrato en la etapa de ejecución con las herramientas contractuales

1 Contraloría General del Estado, (2020) Informe del Contralor General Gestión 2019. C.G.E.

vigentes. No existe temor a incrementar el monto en las obras públicas, por cuanto existe la seguridad que muy remotamente se podrá efectuar una auditoría a la obra en ejecución. También en las obras existen retrasos en las entregas, es otro aspecto no verificado a cabalidad por la Supervisión de obras.

Si se contaría en nuestra legislación dentro de las Normas de Auditoría Gubernamental a la Norma Técnica para el Control Posterior en Obras Públicas, todas las entidades públicas estarían obligadas a examinar posteriormente e informar sobre los aspectos positivos y negativos de la ejecución; por tanto, establecer las responsabilidades correspondientes.

Marco Teórico Referencial

En la primera mitad del siglo XX, el enfoque del trabajo de auditoría tendió a alejarse de la detección de fraude y se dirigió hacia una nueva meta de determinar si los estados financieros presentaban un panorama completo y razonable de la posición financiera, los resultados de la operación y los cambios en la posición financiera. Este desplazamiento fue una respuesta al número creciente de accionistas y al mayor tamaño correspondiente de las entidades corporativas, además que los auditores se tornaron más responsables frente a las agencias gubernamentales, frente a las bolsas de valores y frente a terceros que pudieran depender de la información financiera auditada. La razonabilidad de las ganancias reportadas se convirtió en un asunto de primordial importancia. A medida que las entidades corporativas en gran escala se desarrollaban rápidamente en Gran Bretaña y Estados Unidos, los auditores empezaron a obtener muestras de transacciones seleccionadas. Adicional al muestreo, los auditores tomaron conciencia de la importancia de un control interno efectivo consistente en las políticas y procedimientos establecidos para proporcionar una confiabilidad razonable que los objetivos de la compañía serán alcanzados, incluido el objetivo de reparar estados financieros precisos. Con la mayor dependencia en el muestreo y en el control interno, las normas profesionales empezaron a enfatizar en las limitaciones de la capacidad de los auditores de detectar el fraude. La profesión reconoció que las auditorías diseñadas para descubrir fraudes serían muy costosas. Un buen control interno y los bonos de garantía fueron reconocidos como mejores técnicas de protección de fraude que las auditorías. A partir de la década de 1960, en Estados Unidos la detección de fraude en gran escala asumió un papel más grande en el proceso de auditoría. Las normas profesionales, que utilizaron el término irregularidades en lugar de fraude, describieron la presentación de informes financieros fraudulentos y la malversación de ac-

tivos. Este desplazamiento en el énfasis para tomar una mayor responsabilidad en la detección del fraude fue el resultado de: 1) Un incremento sustancial en la presión del Congreso para asumir una mayor responsabilidad por los fraudes en gran escala; y 2) Una diversidad de procesos judiciales exitosos que reclamaban que los informes financieros fraudulentos habían quedado inapropiadamente sin detección por parte de los auditores independientes y 3) La convicción por parte de los contadores públicos de que debería esperarse de las auditorías la detección de fraude material.²

El control de los recursos fiscales siempre fue un problema especial para el Estado boliviano, sobre todo en los sucesivos periodos de los gobiernos dictatoriales por los que pasó el país. Si bien ya los llamados libertadores del país, Bolívar y Sucre dictaron algunas disposiciones legales con el fin de controlar los recursos y la actividad de los funcionarios públicos, las normas que se dictaron con el intento de fiscalizar el dinero que salía de las arcas fiscales se consolidaron con el Tribunal Nacional de Cuentas. En 1928 el presidente de ese entonces, Dr. Hernando Siles, promovió la llegada de la misión norteamericana Kemmerer con el objetivo de estudiar los sistemas administrativos y financieros con que contaba el país, y de acuerdo a sus resultados, proceder al fortalecimiento, cambio o creación de otras unidades administrativas que aporten en funcionamiento del país. El indicado estudio recomendó la creación de una nueva unidad técnica y operativa que se denominó Contraloría General. Según el instrumento de su creación de 1928, la entidad sería independiente de todos los ministerios del gobierno, pero sujeta al Presidente de la República. La nueva entidad tampoco cumplió las funciones esperadas y fue vulnerable a la injerencia de los detentadores del poder político. Es así que a fines de la década de los 80 se sentaron bases para un cambio estructural de los sistemas de control y administración fiscales. El 20 de julio de 1990, en el gobierno de Jaime Paz Zamora, nace la Ley 1178 de Administración y Control Gubernamentales, comúnmente denominada Ley SAFCO, de aplicabilidad en todas las entidades centralizadas, desconcentradas y descentralizadas del sector público; entre ellas los Municipios, incluidas las universidades estatales porque reciben recursos del Estado.

Esta ley fue elaborada por el organismo CONSAFCO y la participación de expertos del Banco Mundial; su finalidad esencial es que la administración pública programe, organice y controle la captación y el uso eficiente de los recursos públicos.

En Bolivia la estructura de un examen de auditoría está enmarcada en las normas de auditoría gubernamental

2 Aruquipa, G. Tesis de Grado. (2013) *Normativa Jurídica para la Auditoría Técnica en la Ejecución de Obras Públicas en los Municipios del Estado Plurinacional de Bolivia*. U.M.S.A.

vigente y aplicable obligatoriamente por las unidades de auditoría interna de las entidades públicas y la Contraloría General del Estado.

AUDITORÍA GUBERNAMENTAL

También denominada Auditoría de Estado. Es aquella que consiste en la revisión y examen que llevan a cabo las Entidades Fiscalizadoras Superiores a las operaciones de diferente naturaleza, que realizan las dependencias y entidades del Gobierno Central, Estatal y Municipal en el cumplimiento de sus atribuciones legales. Comprende el examen de las operaciones, cualquiera sea su naturaleza, de las dependencias y entidades de la Administración Pública, con el objeto de opinar si los estados financieros presentan razonablemente la situación financiera, si los objetivos y metas efectivamente han sido alcanzadas, si los recursos han sido administrados de manera eficiente y si se han cumplido con las disposiciones legales aplicables.

TIPOS DE AUDITORÍA GUBERNAMENTAL

Los tipos de auditoría gubernamental a la fecha generalmente conocidas son:

- **Auditoría Financiera**, se trata del examen objetivo, sistemático, profesional e independiente, realizado de acuerdo a normas generalmente aceptadas, tomando como base los estados financieros básicos, con el fin de emitir una opinión sobre la razonabilidad de la situación financiera de la empresa, los resultados de sus operaciones y los cambios en su situación financiera.
- **Auditoría Operacional**, es el examen posterior, objetivo y sistemático de la totalidad o parte de las operaciones de una organización, proyecto, programa, además de sus unidades integrantes u operaciones específicas, con el objetivo de determinar el grado de efectividad, economía y eficiencia, formulando recomendaciones para mejorar dichas actividades emitiendo un informe sobre las operaciones evaluadas.
- **Auditoría Ambiental**, se trata de efectuar la revisión del control de calidad ambiental, evaluar la eficacia, de los sistemas de gestión ambiental se mide por el grado de cumplimiento de las disposiciones legales, normas ambientales, criterios e indicadores de las entidades privadas y públicas en términos de la eco eficiencia e impacto ambiental de las operaciones, para identificar deficiencias ambientales, con el propósito de que la actividad empresarial se preocupe en garantizar la reducción de la contaminación
- **Auditoría Especial**, es un examen sistemático de evidencia, cuyo propósito es expresar una opinión

independiente sobre el cumplimiento de disposiciones legales aplicables y obligaciones contractuales, y responde a indicios de responsabilidad en las actividades realizadas por los servidores públicos.

- **Auditoría de Proyectos de Inversión Pública**, se trata de un examen objetivo, sistemático y profesional de las operaciones de una entidad pública, grupo de entidades similares o un sector de la administración pública que respaldan la ejecución de proyectos, a fin de efectuar una evaluación posterior e independiente que permita determinar el grado de responsabilidad, Es necesario puntualizar respecto a este tipo de auditorías en cuanto a la finalidad que conlleva, las mismas son: verificar la existencia de la documentación necesaria para realizar el examen; constatar y registrar la manera en que dicha documentación está organizada; e identificar y recopilar datos que permitan un conocimiento general del sujeto de auditoría, efectividad, eficiencia, economicidad y transparencia en la utilización de los recursos empleados.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

La auditoría de obras públicas, está dirigida al control y fiscalización de una obra pública ejecutada por diversas entidades de Derecho Público, entre ellas Gobiernos Municipales, Gobernaciones, Empresas Públicas, ONGs., etc., deriva del poder de control, en cuanto se relaciona con el patrimonio de la colectividad. La actuación de estas Entidades debe estar enmarcada dentro de la legalidad, Normas Constitucionales, Leyes, Reglamentos, Decretos, etc., desde ese punto de vista, toda actividad de las entidades públicas debe ser sujeta a control, hablando del caso concreto, toda ejecución de obras públicas realizadas por las entidades públicas en el marco de su competencia, deben someterse a una auditoría de obras públicas. El control y fiscalización manifestada a través de la auditoría de obra, que también puede denominarse "Auditoría Técnica", tiene un fundamento jurídico, puesto que su obligatoriedad nace de él. Toda su actividad debe estar enmarcada dentro del ordenamiento legal, ya que tutela intereses públicos. En cuanto a la economía, se busca determinar si con los recursos disponibles, se obtiene el máximo de desempeño de la entidad y, adicionalmente, se verifica el parámetro de los costos.

La Doctrina Moderna considera que es una obligación de la Administración Pública en su actuación rutinaria, establecer un control a las actividades de la administración activa, inclusive dando oportuna solución a los problemas que pudieran presentarse, actuando de conformidad con la Constitución y las Leyes. De igual forma los órganos de control deben evaluar la eficiencia, eficacia, economía, calidad de sus operaciones, con fundamento en índices de gestión, de rendimientos y demás técnicas

aplicables y formular las recomendaciones necesarias para mejorarlo. Es obligación del Estado emitir normas y crear instituciones para efectuar auditoría de obras tendiente a determinar la calidad de las obras públicas, el costo de los mismos y los resultados que se presentan ya materializados en obras públicas ejecutadas, pudiendo constatar con ello, la eficacia con que operan, ya que se realizan inversiones públicas obtenidas a través de los impuestos sobre las actividades de producción y de circulación de mercancías, sobre los ingresos y ganancias de cualquier otra naturaleza.

En resumen, concepto de Auditoría de Obras Públicas puede resumirse de la siguiente manera: "Procedimiento de verificación que efectúa el Órgano de Control, al cumplimiento de los objetivos en los planes y programas de las obras públicas y de los servicios relacionados con ellas, que se contraten para ese fin, así como al ejercicio de los recursos y al desempeño de las funciones a cargo de las Entidades Públicas en Bolivia".

DISEÑO METODOLÓGICO

TIPO DE ESTUDIO

En base a la bibliografía consultada y trabajos de tesis efectuados relacionados al tema planteado, se utilizarán los siguientes:

Estudios exploratorios o formulativos, el primer nivel de conocimiento científico sobre un problema de investigación se logra a través de estudios de tipo exploratorio; tienen por objetivo, la formulación de un problema para posibilitar una investigación más precisa o el desarrollo de una hipótesis. Permite al investigador formular hipótesis de primero y segundo grados.

Para definir este nivel, debe responder a algunas preguntas:

- ¿El estudio que propone tiene pocos antecedentes en cuanto a su modelo teórico o a su aplicación práctica?
- ¿Nunca se han realizado otros estudios sobre el tema?
- ¿Busca hacer una recopilación de tipo teórico por la ausencia de un modelo específico referido a su problema de investigación?
- ¿Considera que su trabajo podría servir de base para la realización de nuevas investigaciones?

Cuando el investigador construye un marco de referencia teórico y práctico puede decirse que este primer nivel de conocimiento es exploratorio, el cual puede comple-

mentarse con el descriptivo, según lo que quiera o no el investigador. Tienen por objeto esencial familiarizarnos con un tema desconocido, novedoso o escasamente estudiado. Son el punto de partida para estudios posteriores de mayor profundidad.

Estudios descriptivos, sirven para analizar cómo es y cómo se manifiesta un fenómeno y sus componentes. Permiten detallar el fenómeno estudiado básicamente a través de la medición de uno o más de sus atributos. El conocimiento será de mayor profundidad que el exploratorio, el propósito de este es la delimitación de los hechos que conforman el problema de investigación, como:

- Establecer las características de las Auditorías de Obras que se realizan actualmente.
- Identificar formas de informes de evaluación técnica que se aplican en las diferentes auditorías.
- Establecer resultados concretos.

Identifica características del universo de investigación, señala formas de conducta y actitudes del universo investigado, establece comportamientos concretos y descubre y comprueba la asociación entre variables de investigación. De acuerdo con los objetivos planteados, el investigador señala el tipo de descripción que se propone realizar. Acude a técnicas específicas en la recolección de información, como la observación, las entrevistas y los cuestionarios, la cual es sometida a un proceso de codificación, tabulación y análisis estadístico.

Estos estudios describen la frecuencia y las características más importantes de un problema. Para hacer estudios descriptivos hay que tener en cuenta dos elementos fundamentales: Muestra, e Instrumento.

Debe responder algunas interrogantes:

- ¿Se propone identificar elementos y características del problema de investigación?
- ¿Busca hacer una caracterización de hechos o situaciones por los cuales se identifica su problema de investigación?
- ¿El problema que Ud. plantea y los hechos que comprende abarcan formas comportamientos sociales, actitudes, creencias, formas de pensar y actuar de un grupo?
- ¿Espera que los resultados de su investigación sean base para la formulación de nuevas hipótesis a partir de las cuales se inicia un conocimiento explicativo?

POBLACIÓN Y MUESTRA

Para efectuar la presente investigación, se utilizará como población a la Contraloría General del Estado como ente rector del Control Posterior y responsable de la realización de auditorías especiales a las obras públicas construidas en Bolivia.

ELABORACIÓN DE INSTRUMENTOS

Para este fin, se diseñará un cuestionario que contenga principalmente datos de cantidad de obras públicas ejecutadas y auditadas en Bolivia tanto por las Unidades de Auditoría Interna de las Entidades Públicas, como por la Sub Contraloría de Servicios Técnicos de la Contraloría General del Estado.

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTOS

Para que un cuestionario sea validado, debe reunir los siguientes requisitos:

- a) Ser fiable y capaz de medir sin error.
- b) Ser capaz de detectar y medir cambios.
- c) Ser sencillo y aceptado por participantes, usuarios e investigadores

APLICACIÓN DE INSTRUMENTOS

La aplicación del cuestionario se efectuará a funcionarios actuales de la Gerencias Departamentales de la Contraloría General del Estado, a algunos servidores públicos dependientes de las Unidades de Auditoría Interna de las Entidades Públicas.

PLAN DE TABULACIÓN Y ANÁLISIS

Los datos recopilados serán tabulados en formato de matrices, de modo que respondan y ser base para la aprobación o desaprobación de la hipótesis. En consecuencia, conducirán preponderantemente a la aprobación, además de reflejarse como evidencias en las conclusiones.

INTERPRETACIÓN DE DATOS

La interpretación de los datos obtenidos, ordenados será la base del análisis de la propuesta del presente trabajo.

CONCLUSIONES

- En base al planteamiento del presente perfil de tesis, es posible efectuar la investigación del tema planteado y proponer una norma aplicable en las entidades públicas, para efectuar auditorías a todas las obras

construidas y elaboración de un manual técnico, de la norma para su propuesta y consideración.

- La legislación vigente en el país permitirá diseñar un instrumento o guía técnica para realizar una auditoría técnica a las obras públicas. Parte del presente trabajo. Una vez aplicado los instrumentos y las técnicas se podrán obtener los resultados esperados

RECOMENDACIONES

- Los cuestionarios deberán ser aplicados a personal clave de las entidades públicas involucrados en el control posterior.
- Verificar constantemente decretos y reglamentos que modificaron las normas actuales, referentes a los sistemas que conforman la Ley de Administración y Control. Antes de introducirlos como parte de fundamento legal para el presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Jiménez, R, (2008) *auditoría de obra pública*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla - Facultad de ingeniería Civil - División de Estudios de Posgrado

Aruquipa, G. Tesis de Grado. (2013) *Normativa Jurídica para la Auditoría Técnica en la Ejecución de Obras Públicas en los Municipios del Estado Plurinacional de Bolivia*. U.M.S.A.

Banco Interamericano de Desarrollo, (2005) *Manual de Auditoría Técnica y Gestión de la Calidad Total*. atn/mt-7957-rg

Contraloría General del Estado, (2020) *Informe del Contralor General Gestión 2019*. C.G.E.

Estado Plurinacional de Bolivia, (2009) *Constitución Política del Estado*. Gaceta Oficial

Estado Plurinacional de Bolivia, (2009) *D.S. n° 0181 normas básicas del sistema de contratación de bienes y servicios*. Gaceta Oficial

República de Bolivia, (1990) *ley n° 1178 de Administración y Control Gubernamentales*. Gaceta Oficial

República de Bolivia, (1992) *D.S. N° 23215 de Reglamento para el Ejercicio de las Atribuciones de la Contraloría General de la República*. Gaceta Oficial



Efecto de la succión matricial en la distribución de esfuerzos verticales generados por el paso de un vehículo en una arena limosa bajo diferentes condiciones ambientales

Artículo presentado en la 3ra Conferencia Panamericana en suelos No Saturados (Río de Janeiro, Brasil)

Torrigo, J.A.^a, Miranda, S.^b, Cornellis, W.^c, Rojas, J.C.^d, Bezuijen, A.^e, Di Emidio, G.^f

^a Responsable Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), doctorando en Ingeniería Civil Universidad de Gante-Bélgica, Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Planta baja, Sucre, Bolivia. E-mail: JuanAlfredo.TorrigoBravo@UGent.be

^b Estudiante de maestría en Geotecnia (USFX). Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: salvathorem@gmail.com.

^c Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de Biociencias, Universidad de Gante. E-mail: Wim.Cornelis@ugent.be.

^d 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.

^e Director del laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Gante, Universidad de Gante. E-mail: Adam.Bezuijen@ugent.be.

^f Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de ingeniería civil. E-mail: Gemmina.DiEmidio@ugent.be.

RESUMEN

La succión matricial en un suelo varía con los cambios ambientales que puede ocasionar una lluvia o un día soleado. El presente artículo estudia el efecto de la succión matricial, registrada en dos condiciones ambientales distintas, que ha sido inducida por el paso de un vehículo sobre un suelo constituido por una arena limosa con grava (SM). Para evaluar la variación de la succión matricial, se instalaron tensiómetros jet fill a dos profundidades diferentes (15 cm y 30 cm); Para registrar los incrementos en las tensiones verticales del subsuelo, se instalaron dos células de carga de compresión pequeñas (16,5 mm de diámetro) en posición paralela a la superficie del suelo, a la misma profundidad de los tensiómetros y bajo la línea central de la trayectoria de la rueda izquierda trasera de un camión. La presión de inflado de los neumáticos fue de 380 kPa. Se ha tenido cuidado de calibrar las células de carga en condiciones de campo antes de las pruebas. Las tensiones verticales medidas, han sido validadas utilizando las soluciones analíticas de Boussinesq y Söhne. Los resultados obtenidos han demostrado que, una disminución en la succión matricial debido a condiciones ambientales saturadas, favorece el incremento en los esfuerzos verticales del suelo a ambas profundidades estudiadas.

Palabras clave: Succión matricial, tensiómetros red fill, células de carga, incremento de esfuerzo vertical.

ABSTRACT

Matric suction in a soil profile depends on the environmental conditions, as in the case of a rainy day or a sunny day. This research, studies the matric suction changes registered along two environmental conditions, induced by a wheeling with a minitruck over a silty sand with gravel (SM). To evaluate the matric suction, jet fill tensiometers were installed at two different depths (i.e. 15 cm y 30 cm); to register the increase on subsoil vertical stresses, two miniaturized compression load cells (i.e. 16.5 mm in diameter) were installed in a plane parallel to the soil surface, at the same depth of tensiometers and under the center line of the minitruck wheels' path. Tyre inflation pressure applied on wheels was 380 kPa. Care was taken to calibrate the load cells in field conditions before the tests. Measured stresses were validated applying the Boussinesq and Söhne solutions. The corresponding results demonstrated that, a registered decrease in matric suction due to the saturated environmental conditions, favors the increase of vertical stress in the subsoil profile at the two depths specified.

Key words: Matric Suction, red fill tensiometers, load cells, increase of vertical stress.

INTRODUCCIÓN

Los suelos parcialmente saturados han sido objeto de numerosos trabajos de investigación en las últimas dos décadas, actualmente en nuestro medio existe la base teórica para entender su comportamiento. Por otro lado, los principales problemas geotécnicos que involucran a los suelos no saturados, están relacionados con cambios ambientales, y estos cambios modifican principalmente la succión matricial.

La succión matricial se define como la presión negativa que debe aplicarse al agua que tiene una composición idéntica a la del suelo, para que alcance el equilibrio con ésta a través de una membrana semipermeable (Schofield, 1935). Su comprensión es fundamental a la hora de resolver problemas de ingeniería asociados con la mecánica de suelos no saturados.

El propósito de este artículo es analizar el efecto de la succión matricial en el incremento de esfuerzos verticales de un suelo, causados por el paso de los neumáticos de un vehículo; todo ello bajo dos condiciones ambientales: Una, en condiciones saturadas (después de una lluvia) y la otra, en condiciones secas (en un día soleado). Bajo estas dos premisas, los objetivos del presente estudio son:

- Realizar una medición "in situ" del incremento de los esfuerzos verticales en el suelo a las profundidades de 15 cm y 30 cm, debajo del neumático trasero de un vehículo, previa selección de una determinada presión de inflado. Para éste trabajo de campo, se cuenta con células de carga de compresión de tecnología italiana.
- Validar las mediciones "in situ" de los esfuerzos verticales, mediante los modelos de Boussinesq, para carga rectangular, y Söhne, para una carga circular.
- Medición de la succión matricial en las dos condiciones ambientales y en los mismos puntos de análisis de los esfuerzos verticales.
- Analizar el efecto de la succión matricial con respecto al incremento de los esfuerzos verticales en el momento del paso del neumático del vehículo en las dos condiciones ambientales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de experimentación y propiedades del vehículo.

El terreno, en el cual se han desarrollado los ensayos de campo, se encuentra localizado en la ciudad de Sucre, Bolivia, (19° 2' 50.29"S, 65° 15' 10.68"O). El suelo es una arena limosa con grava (SM), de acuerdo al Sistema Uni-

ficado de Clasificación de Suelos. El vehículo utilizado es un camión Mitsubishi CANTER modelo FE150EO3 con 2M3 de capacidad, con un tipo de neumático LT 205/85 R16 cargado a una presión de inflado de 380 kPa. En la anterior publicación de ésta revista (Torrico et. al., 2020) se encuentran mayores detalles del terreno, vehículo, neumático y las propiedades del suelo.

Como se indicó anteriormente, se han realizado pruebas en dos condiciones ambientales. En el ensayo de campo que ha sido realizado en condiciones ambientales saturadas, los contenidos de humedad obtenidos son 18.89 % a 15 cm de profundidad y 14.62 % a 30 cm de profundidad. En el ensayo realizado en un día soleado (Torrico et. al., 2020), los contenidos de humedad fueron de 8.11 % a 15 cm y 11.73 % a 30 cm.

Mediciones "in situ" del incremento de los esfuerzos verticales y del área de contacto entre neumáticos y terreno.

Se cuenta con células de carga de compresión de tecnología italiana (Torrico et. al., 2020), las cuales han sido instaladas en el subsuelo a las profundidades de 15 cm y 30 cm, se ha tenido cuidado que la posición de las células coincida con el centro de la huella del neumático y que estén con la mayor proximidad a los muestreos realizados para obtener los contenidos de humedad respectivos y las demás relaciones volumétricas.

En cada condición ambiental del ensayo, y con la ayuda de hojas de papel, se ha tenido el cuidado de medir el área de contacto entre el neumático y el suelo.

Validación de las mediciones "in situ" del incremento de esfuerzos verticales

Con el propósito de validar las mediciones del incremento del esfuerzo vertical en las dos pruebas de campo que se han realizado para diferentes condiciones ambientales, se han calculado los incrementos del esfuerzo vertical utilizando las ecuaciones de Boussinesq (1885) para cargas distribuidas rectangulares y el modelo de Söhne (1958) para cargas circulares.

Las ecuaciones Eq. (1) a (3) corresponden a la teoría de Boussinesq para obtener los incrementos de esfuerzos verticales para una carga rectangular (Braja. M. Das, 2013), la ecuación Eq. (4) corresponde al modelo de Söhne

$$\Delta\sigma_z = q \cdot I_z \quad Eqn (1)$$

$$I_z = f(m', n') \quad Eqn (2)$$

$$I_z = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{2m'n'\sqrt{m'^2+n'^2+1}}{m'^2+n'^2+m'^2n'^2+1} \left(\frac{m'^2+n'^2+2}{m'^2+n'^2+1} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{2m'n'\sqrt{m'^2+n'^2+1}}{m'^2+n'^2-m'^2n'^2+1} \right) \right] \quad Eqn (3)$$

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^{i=n} (\sigma_z)_i = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{vP_i}{2\pi z_i^2} \cos^{v+2}\theta_i \quad Eqn(4)$$

Para mayores detalles de las ecuaciones Eq. (1) a (4), se puede consultar la anterior publicación de esta revista (Torrigo et. al., 2020).

En ambas soluciones analíticas, el área de contacto entre el neumático y el suelo es un dato importante para introducir en las ecuaciones. En la prueba de campo realizada en condiciones saturadas (después de una lluvia) se ha medido un área de contacto de 386 cm², mientras que en la prueba de campo realizada en condiciones ambientales soleadas se ha medido un área de contacto de 365 cm² (Torrigo et. al., 2020).

Monitoreo de la succión matricial

Tensiómetros tipo red fill (Torrigo et. al., 2020) han sido instalados en el terreno de prueba con la mayor proximidad a las células de carga, para medir la succión matricial "in situ". El propósito, obtener el valor de la succión matricial para cada profundidad en el momento del paso de la rueda trasera izquierda del vehículo. Esta operación fue realizada en las dos condiciones ambientales de los ensayos y en las profundidades establecidas de 15 cm y 30 cm. El monitoreo de la succión se ha realizado tres veces al día (Torrigo, et. al. 2021).

Procedimiento de los ensayos de campo

En el ensayo de campo realizado en condiciones ambientales saturadas, se ha seguido el procedimiento descrito por Keller (2005) y Arvidsson et. al. (2007). Las células de carga han sido instaladas por simple excavación a las profundidades predeterminadas de 15 cm y 30 cm. Una vez excavado el perfil a éstas profundidades, las células de carga se han colocado con el cuidado de garantizar un buen contacto con el suelo circundante. Varios artículos han comprobado que una buena medición se logra cuando las células de carga son instaladas en un plano paralelo a la superficie del suelo (Keller, 2004; Trautner, 2003). Posteriormente, se ha rellenado el terreno hasta el nivel original. Por lo tanto, la estructura original de la capa superior del suelo ha sido alterada.

El procedimiento de campo realizado para la prueba en condiciones ambientales soleadas se describe en la anterior publicación de esta revista técnica (Torrigo et. al., 2020).

A lo largo de los ensayos de campo realizados en las dos condiciones ambientales, se tuvo mucho cuidado de mantener lo más cerca posible el neumático seleccionado del vehículo, a los tensiómetros jet fill que se han instalado; esto para que las piedras porosas de los tensiómetros estén próximas a la zona de modificación de la succión matricial.

Muestras cilíndricas (50 mm de diámetro, 50 mm de altura) han sido extraídas en las dos pruebas de campo realizadas y a las dos profundidades de 15 cm y 30 cm. Las muestras han sido llevadas al laboratorio, pesadas y luego sometidas a secado en un horno, a una temperatura de 105°C por 24 horas. Posteriormente, las muestras se han retirado del horno, y han sido pesadas nuevamente para, finalmente, determinar las relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo: El contenido gravimétrico de humedad, relación de vacíos, porosidad y grado de saturación.

RESULTADOS

Medición y validación del incremento de los esfuerzos verticales en el perfil de suelo

Las tablas 1 y 2 muestran los resultados de los incrementos de esfuerzos verticales que se han obtenido en las dos pruebas de campo realizadas a diferentes condiciones ambientales. Los resultados corresponden a las mediciones realizadas, como también a las soluciones analíticas de Boussinesq (1885) y Söhne (1953).

Tabla 1. Condiciones ambientales soleadas: Resultados de las mediciones y cálculos del incremento del esfuerzo vertical σ_z (Torrigo et.al., 2020).

No	Prof. (cm)	Esfuerzo Vertical σ_z (kPa)		
		BC-302	Solución de Boussinesq.	Solución de Söhne.
1	15 cm	171.21	177.35	174.62
2	30 cm	59.07	63.92	62.78

Para tener una mayor aclaración de los resultados de la prueba de campo realizada en condiciones ambientales soleadas, referirse a la anterior publicación de esta revista (Torrigo et. al., 2020).

Tabla 2. Condiciones ambientales saturadas: Resultados de las mediciones y cálculos del incremento del esfuerzo vertical σ_z .

No	Prof. (cm)	Esfuerzo Vertical σ_z (kPa)		
		BC-302	Solución de Boussinesq.	Solución de Söhne.
1	15 cm	182.62	183.27	180.26
2	30 cm	68.48	67.07	65.89

La figura 1 muestra los resultados obtenidos en la prueba de campo que se ha realizado en condiciones ambientales saturadas, se muestran las mediciones conseguidas con las células de carga, así como los resultados de las soluciones analíticas.

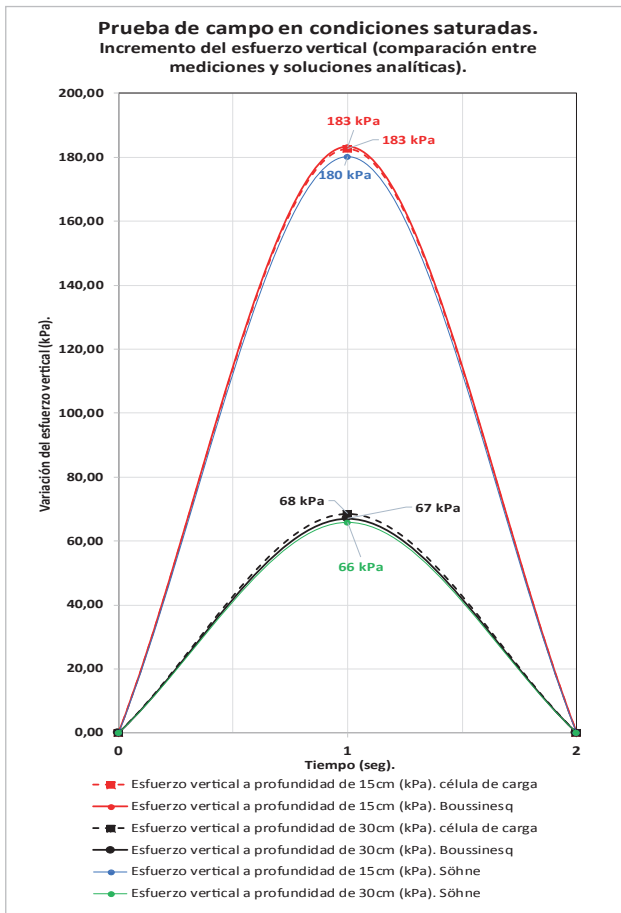


Figura 1. Variaciones de esfuerzos verticales medidos (líneas segmentadas de color rojo y negro), esfuerzos verticales calculados utilizando la solución de Boussinesq para una carga rectangular (líneas continuas de color rojo y negro) y el modelo de Söhne (líneas continuas de color azul y verde).

Para la prueba de campo que se ha realizado en condiciones ambientales saturadas, utilizando el modelo de Söhne se ha empleado un factor de concentración $\nu=3$. El artículo de Keller et al. (2014, 2016) comprueba que este valor tiene una buena correlación para calcular estados tensionales a pequeñas profundidades (como las que estamos manejando en el presente artículo) y además, trabaja bien incluso cuando el suelo se deforma.

Para ambas pruebas de campo, se ha utilizado el mismo camión Mitsubishi CANTER modelo FE150EO3 con 2M3 de capacidad, se ha analizado bajo el mismo neumático trasero izquierdo tipo LT 205/85 R16 y se ha manejado la misma presión de inflado de 380 kPa. Comparando los resultados de las mediciones y las soluciones analíticas (Tablas 1 y 2), se observa que las células de carga de compresión BC-302 han proporcionado una adecuada estimación de los esfuerzos verticales (Torrico et al., 2020). Por lo tanto, quedan validadas las mediciones del incremento del esfuerzo vertical.

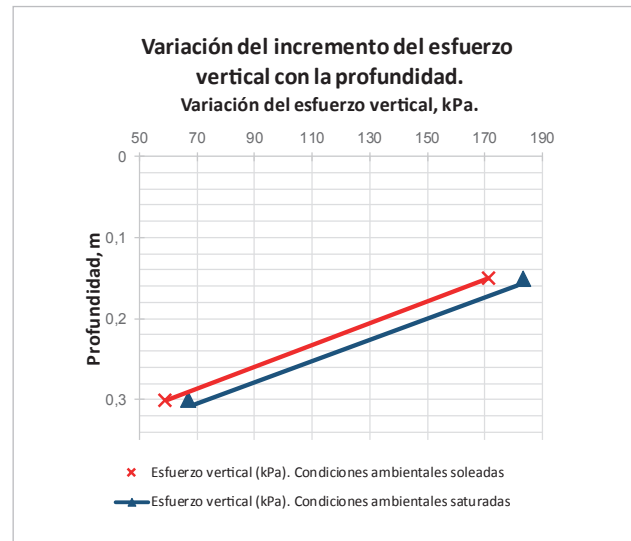


Figura 2. Variación de σ_z con la profundidad: Los esfuerzos disminuyen con la profundidad de análisis. La saturación del suelo produce que los valores de σ_z se incrementen a ambas profundidades (color azul).

Comparando los resultados de las dos pruebas campo que se han realizado a diferentes condiciones ambientales, se observa que los incrementos de esfuerzo vertical obtenidos, son mayores en las condiciones saturadas (Tabla 2) para las dos profundidades predeterminadas. A 15 cm de profundidad, la saturación del suelo generó un incremento de 11.41 kPa; a 30cm de profundidad, el incremento fue de 9.41 kPa. Por lo tanto, la humedad genera un incremento en el estado tensional del subsuelo (Figura 2 y 3).

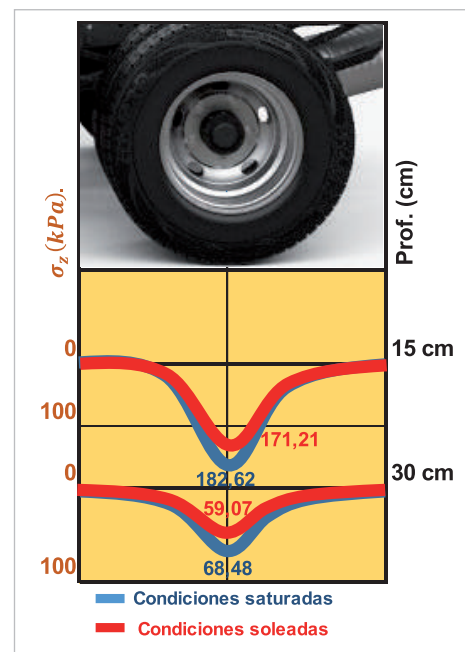


Figura 3. Visualización de las mediciones del incremen-

to de esfuerzos verticales realizadas con células de carga de compresión BC-302, a las dos profundidades predeterminadas, y en las dos condiciones ambientales definidas de las pruebas de campo.

Tabla 3. Resumen de resultados obtenidos (Torrice et. al., 2021)

Prof. (cm).	turno	Contenido gravimétrico de humedad (w) (%).		Succión matricial (s) (kPa).		Incremento de Esfuerzo vertical (σ_z) (kPa).		Porosidad (n).		Grado de saturación (S) (%).	
		Prueba en cond. húmeda	Prueba en cond. soleada	Prueba en cond. húmeda	Prueba en cond. soleada	Prueba en cond. húmeda	Prueba en cond. soleada	Prueba en cond. húmeda	Prueba en cond. soleada	Prueba en cond. húmeda	Prueba en cond. soleada
15	Tarde	18.89	8.11	2	31	182.62	171.21	0.435	0.378	64.94	35.34
30	Tarde	14.62	11.73	16	21	68.48	59.07	0.413	0.398	54.86	46.94

Mediciones de la succión matricial y su efecto en el incremento de los esfuerzos verticales

A lo largo de las dos pruebas de campo realizadas, se ha monitoreado la succión matricial a 15 cm y 30 cm de profundidad. En las figuras 4 y 5 se muestran los resultados del monitoreo, a las dos profundidades, y se puede observar que los valores máximos de succión registrados no sobrepasan los 60 kPa.

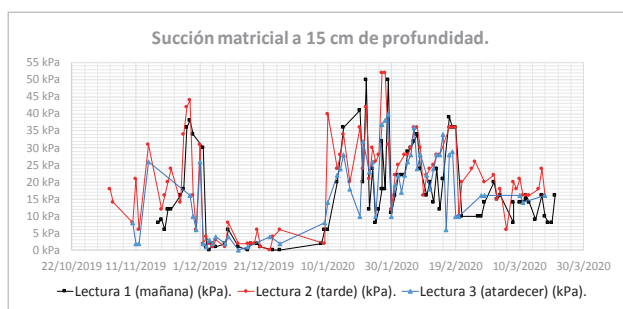


Figura 4. Monitoreo de la succión matricial con tensiómetros jet fill a 15 cm de profundidad.

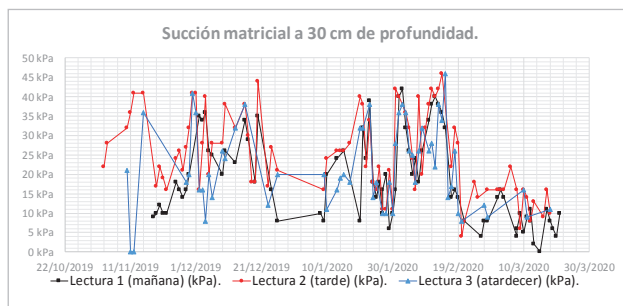


Figura 5. Monitoreo de la succión matricial con tensiómetros jet fill a 30 cm de profundidad.

El registro de succiones matriciales que se muestra, ha servido para separar los correspondientes valores de succión matricial en el momento de las pruebas de campo realizadas en las dos condiciones ambientales. De éste modo, en la prueba de campo en condiciones

soleadas (Torrice et. al., 2020), en el momento del paso del neumático, se han registrado succiones matriciales de 31 kPa a 15 cm de profundidad y 21 kPa a 30 cm de profundidad (Tabla 3).

En la prueba de campo realizada en condiciones saturadas, en el momento del paso del neumático, se han registrado succiones matriciales de 2 kPa a 15cm de profundidad y 16 kPa a 30 cm de profundidad (Tabla 3).

En la tabla 3, también se muestran los incrementos de esfuerzos verticales y un resumen de los resultados obtenidos en el perfil de suelo en lo que respecta a las relaciones volumétricas (contenido de humedad, porosidad, grado de saturación).

Los resultados obtenidos que se muestran en la tabla 3, nos permiten apreciar que:

El grado de saturación es una propiedad que afecta la succión matricial: Si el grado de saturación es alto, como en la prueba en condición ambiental saturada, la succión matricial tiene un valor bajo. En cambio, si el grado de saturación es bajo, como en la prueba de campo en condición ambiental soleada, entonces la succión matricial tiene un valor elevado.

La succión matricial tiene un efecto en el área de contacto suelo-neumático, el cual a su vez influye en el incremento del esfuerzo vertical. En la prueba de campo realizada en condiciones ambientales saturadas, se tienen pequeños valores de succión matricial (2 kPa a 15 cm y 16 kPa a 30 cm de profundidad); los cuales han influido en un incremento del área de contacto suelo-neumático (a 386 cm²) y un consiguiente incremento del esfuerzo vertical (182.62 kPa a 15 cm y 68.48 kPa a 30 cm). Mientras que, en la prueba realizada en condiciones soleadas, se registraron valores altos de succión matricial (31 kPa a 15 cm y 21 kPa a 30 cm), que han influido en una disminución del área de contacto suelo-neumático (a 365 cm²) y una consecuente reducción del esfuerzo vertical (171.21 kPa a 15 cm and 59.07 kPa a 30 cm).

En las dos pruebas de campo que se han realizado a diferentes condiciones ambientales, pese a que se han analizado las mismas zonas de estudio, las mediciones registradas de succión matricial presentan valores distintos a una misma profundidad. Esto es lógico y explicable, debido a que cada prueba de campo ha sido realizada en una condición ambiental diferente. La prueba de campo que se ha realizado en condiciones ambientales saturadas, ha registrado altos grados de saturación, 64.94% a 15 cm y 54.86% a 30 cm de profundidad. Por consiguiente, los valores registrados de succión matricial han sido bajos, 2 kPa y 16 kPa, respectivamente. En la prueba de campo realizada en condiciones ambientales soleadas, se ha registrado un descenso de los grados de saturación, 35.34 % a 15 cm y 46.94% a 30 cm. Consecuentemente, las succiones matriciales registradas aumentaron, 31 kPa a 15cm y 21 kPa a 30 cm.

La figura 6 muestra la variación que ha experimentado la succión matricial (líneas continuas naranja y púrpura), en las dos profundidades predeterminadas y en las dos pruebas de campo. Si comparamos ambas pruebas, tomando como referencia la prueba en condiciones saturadas, se puede observar que, a 15 cm de profundidad (línea continua naranja), la succión matricial se ha incrementado en 29 KPa y que el esfuerzo vertical en el perfil de suelo a disminuido 11.41 kPa. A la profundidad de 30 cm (línea continua púrpura), desde la prueba en condiciones saturadas a la prueba en condiciones seca, la succión matricial se ha incrementado 5 kPa y consecuentemente el estado tensional de esfuerzos verticales ha sufrido una disminución de 9.41 kPa.

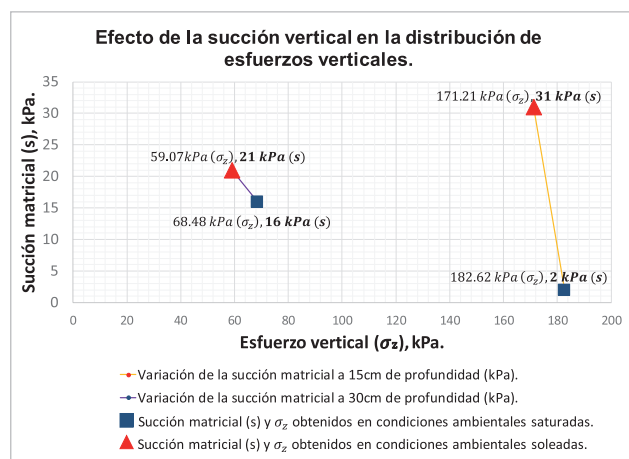


Figura 6. Variación de la succión matricial con el incremento del esfuerzo vertical, a 15 cm de profundidad (línea continua naranja) y a 30 cm de profundidad (línea continua púrpura), que se ha obtenido en las pruebas de campo en condiciones saturadas (cuadrados de color azul) y condiciones soleadas (Triángulos de color rojo).

Por lo tanto, los resultados nos muestran que, en las dos pruebas de campo realizadas a diferentes condiciones ambientales, para una determinada profundidad, el incremento de la succión matricial generado por la disminución en el área de contacto suelo-neumático, va a generar una consecuente reducción en el incremento del esfuerzo vertical en el perfil de suelo.

CONCLUSIONES

La presente investigación concluye que, existe un efecto de la succión matricial en el incremento del esfuerzo vertical originado en un perfil de suelo por el que pasa encima una carga de neumático de un vehículo. Con un incremento de la succión matricial, tal como el que se ha registrado de la prueba de campo en condiciones saturadas a la prueba en condiciones soleadas, se genera una disminución del esfuerzo vertical.

El incremento en el área de contacto suelo-neumático, como resultado de una disminución en la succión matricial, es la razón principal del aumento del esfuerzo vertical en el perfil de suelo. Por consiguiente, la disminución en el área de contacto suelo-neumático, que ha resultado de un incremento de la succión matricial, genera una disminución en la distribución de esfuerzos verticales en el perfil de suelo.

Las mediciones realizadas del incremento de los esfuerzos verticales, utilizando las células de carga de compresión BC-302, se acercan bastante a los resultados analíticos que se han obtenido con las soluciones de Boussinesq y Söhne. También se ha comprobado que la distribución de los esfuerzos verticales disminuye a medida que aumenta la profundidad del perfil de suelo.

Por las características del suelo en nuestro país, en todas las obras civiles en las cuales se encuentre involucrado el suelo como material de construcción, se deben tener en cuenta las condiciones de saturación parcial, que hacen que la resistencia del suelo se incremente. Por lo tanto, al tener en cuenta el término de la succión en el diseño, se van a obtener obras más económicas y funcionales.

Para futuras investigaciones, de acuerdo con el diseño experimental aprobado por nuestro supervisor de doctorado, se tiene planificado variar la presión de inflado del neumático en 40 kPa por encima y por debajo de la presión recomendada. También se tiene previsto realizar ensayos de presión de consolidación para verificar si los estados tensionales generados con el paso del vehículo, provocan que el perfil de suelo analizado permanezca en estado elástico o ingrese en un estado plástico.

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 ha sido gentilmente facilitado por el estudiante Fredy Saavedra Z. El vehículo utilizado en los ensayos con las células de carga ha sido gentilmente proporcionado por el ingeniero Gustavo Suárez. Agradecimientos a los estudiantes Max Robert Salinas y Fredy Saavedra por el apoyo realizado en los ensayos de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Torrice, J.A., Miranda, S., Cornellis, W., Rojas, J.C., Di Emidio, G., & Bezuijen, A. (2021). Matric suction effect on distribution of stresses caused by vehicle wheels on a bare silty sand. *PanAm-Unsat 2021: 3rd Pan-American Conference on Unsaturated Soils*. **337**, 03004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133703004>
- Schofield, A. N. (1935). The Pf of the water in soil. *Trans 3rd Int. Cong. Soil Science*. **2**, 37-48.
- Torrice, J.A., Miranda, S., Cornellis, W., Rojas, J.C., Di Emidio, G., & Bezuijen, A. (2020). Medición del incremento de esfuerzos verticales generados por un vehículo en una arena limosa. *Ingenium*. **1**, 123-128.
- Boussinesq, J. (1885). *Application des potentials à l'étude de l'équilibre et du mouvement des élastiques*. [Application of Potentials in the Study of the Equilibrium and the Movement of Elastic Bodies]. Gauthier-Villars, Paris 30pp.
- Söhne, W. (1958). Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres. *Agricultural Engineering*. **39**, 276-281 290.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentals of Geotechnical Engineering 4th Edition*. Cengage Learning. **ISBN 978-1-111-5765-2**.
- Keller, T. (2005). A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below Agricultural Tyres from readily Available Tyre Parameters. *Biosyst. Eng.* **92**, 85-96, doi: [10.1016/j.biosystemseng.2005.05.012](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.05.012).
- Arvidsson, J., and Keller, T. (2007). Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil. Till Res.* **96**, 284-291, doi: [10.1016/j.still.2007.06.012](https://doi.org/10.1016/j.still.2007.06.012).
- Keller, T. (2004). *Soil Compaction and Soil Tillage-Studies in Agricultural Soil Mechanics*. Doctoral Thesis. **Agraria 489**, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, Sweden.
- Trautner, A. (2003). *On soil Behaviour During Field Traffic*. Doctoral Thesis. **Agraria 372**, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, Sweden.
- Keller, T., Berli, M., Ruiz, S., Lamandé, M., Arvidsson, J., Schjønning, P., and Selvadurai, A.P.S. (2014). Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil Till. Res.* **140**, 106-117, doi: [10.1016/j.still.2014.03.001](https://doi.org/10.1016/j.still.2014.03.001).
- Keller, T., Ruiz, S., Stettler, M., and Berli, M. (2016). Determining Soil Stress beneath a Tyre: Measurements and Simulations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **80**, 541-553, doi: [10.2136/sssaj2015.07.0252](https://doi.org/10.2136/sssaj2015.07.0252).



Informe técnico sobre el análisis tensional e importancia estructural del riego de liga

NÚÑEZ, L.^a

a. Docente de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de San Francisco Xavier de Chuquisaca mención Vías de Comunicación, Destacamento 317 Ex campus REFISUR 573, Sucre – Bolivia. Email: ligia_nb@hotmail.com

RESUMEN

Un pavimento actúa en forma escalonada con referencia a la transferencia de carga y la distribución de presiones desde la capa más externa del paquete estructural hasta la más profunda. En pavimentos con mezclas asfálticas las tensiones generadas por la acción del tránsito son absorbidas por el paquete estructural, razón por la cual es importante garantizar una adecuada adherencia entre capas, fundamentalmente entre la carpeta de asfalto y la capa granular, de la efectividad de esta adherencia depende el comportamiento estructural del paquete en conjunto y la durabilidad de nuestro pavimento a través de una adecuada transmisión de cargas. En el caso de que esta adherencia no se logre sucederá un rompimiento de la transmisión de tensiones entre una y otra capa incrementándose las tensiones en las fibras inferiores de la carpeta de rodadura con el consecuente futuro fisuramiento de la misma. En el presente artículo se analizará los trabajos realizados con relación a esta problemática, valorando su comportamiento estructural, además de comentar metodologías de ensayo de las tensiones producidas en servicio y las presentes en el ensayo de tracción del riego y analizar las mismas mediante la técnica de elementos finitos.

Palabras clave: Análisis tensional, importancia estructural, riego de liga

ABSTRACT

A pavement acts in staggered form with reference to load transfer and pressure distribution from the outermost layer of the structural package to the deepest. In pavements with asphalt mixtures, the stresses generated by the action of the transit, are absorbed by the structural package, which is why it is important to ensure an adequate adhesion between layers, fundamentally between the asphalt folder and the granular layer, the effectiveness of this adhesion depends on the structural behavior of the package as a whole and the durability of our pavement through an adequate load transmission. In the event that this adhesion is not achieve, a rupture of the transmission of tensions between one layer and another will occur, increasing the tensions in the lower fibers of the rolling folder with the consequent future cracking of the same. This article will analyze the work carried out in relation to this problem, assessing its structural behavior, in addition to discussing on in-service stress testing methodologies and those present in the irrigation tensile test and analyzing them using the finite element technique.

Palabras clave: Stress analysis, structural importance, league irrigation

INTRODUCCIÓN

En el comportamiento de un pavimento asfáltico las tensiones que genera la carga del tráfico vehicular, en la carpeta de rodadura son transmitidas a las capas inferiores, de manera que los esfuerzos se disipen a mayor profundidad y sean absorbidos por el conjunto del paquete estructural. El elemento de trabazón entre la capa granular y la capa bituminosa es el riego de liga, cuya función principal es la de garantizar la efectividad de esta adherencia, caso contrario si no se logra una trabazón entre ambas capas, ocurrirá que las fibras inferiores de la capa de rodadura sufrirán un incremento considerable en las tensiones de tracción, lo que ocasionará un temprano fisuramiento del pavimento por fatiga.

DESARROLLO

1. UBICACIÓN ADECUADA DEL RIEGO DE LIGA EN UN PAVIMENTO

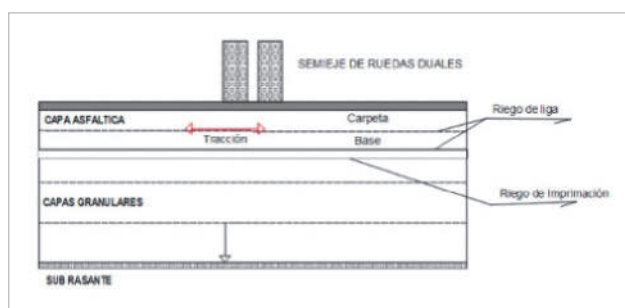


Figura 1: Ubicación de riego de liga dentro del paquete estructural

Es importante conocer que el riego de liga constituye un importante elemento dentro del paquete estructural de un pavimento asfáltico, su ubicación dentro del contexto, su correcta dosificación y su forma de aplicación constructiva son elementos que inciden en el funcionamiento estructural del pavimento en su conjunto.

Un adecuado riego de liga debe cumplir los siguientes parámetros mínimos:

- Dosificación adecuada de ligante asfáltico.
- Uniformidad de la película asfáltica
- Tiempo de rotura de la emulsión

- Condición adecuada de la superficie de apoyo

2. ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE EL RIEGO DE LIGA

Actualmente en nuestro país no existe una normativa definida que delimite las exigencias y control que se debe tener con relación al riego de liga considerándolo como un elemento que aporta estructuralmente al paquete de pavimento. Recopilando diferentes investigaciones se ha podido concluir que a nivel mundial se realizan usualmente dos tipos de ensayos para el control del riego de liga, sobre probetas cilíndricas vaciadas en laboratorio compuestas por dos capas de concreto asfáltico unidas por un riego de liga. En el primer caso se ejerce una fuerza de corte para valorar la tensión de despegado de las capas y en el segundo caso se ejerce un esfuerzo de tracción. Ambos ensayos son realizados a una temperatura promedio de 25°C.

2.1 Ensayo de Tracción

El ensayo a tracción consiste en someter a una probeta de $D=100\text{mm}$ conformada por dos capas de mezcla asfáltica y unidas por un riego de liga, a una prensa con mordazas de acero que ejerce una fuerza tractiva sobre el testigo para separar las capas, incrementando la fuerza tractiva hasta que se produzca el desprendimiento respectivo.

Para obtener los valores de carga y deformación, es necesario incorporar al equipo una celda de carga y un transformador diferencial. El cálculo de la tensión promedio de tracción que produce el despegado de las capas, se obtiene dividiendo la carga máxima entre el área de riego. (sección circular de la probeta)

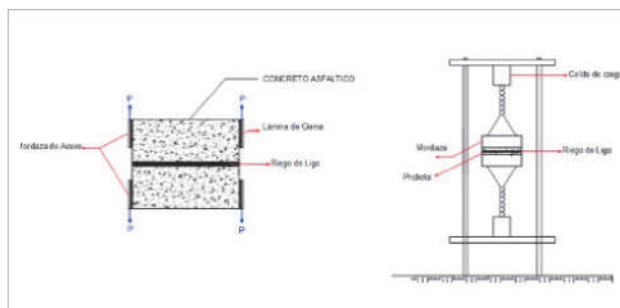


Figura 2. Vista en corte de la probeta. Ensayo a tracción

2.2 Ensayo al corte

Para este ensayo la probeta es sometida a un esfuerzo de corte, el testigo se sujeta en forma horizontal a dos mordazas que evitan esfuerzos de flexión por su rigidez. La tensión promedio de corte que produce el despegado de ambas capas de mezcla asfáltica se obtiene dividiendo la carga de corte por la sección circular de la probeta.

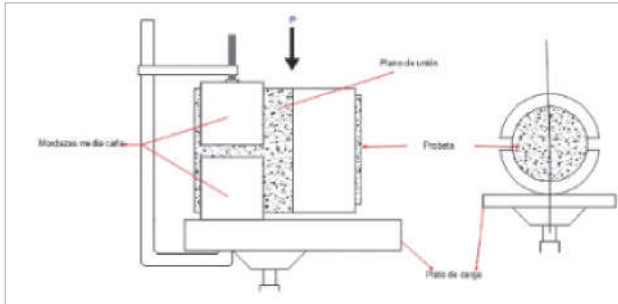


Figura 3. Ensayo de corte

La ventaja del ensayo de corte radica, en que representa de forma más real la sollicitación a la cual está sometido un riego de liga en el pavimento, sin embargo, el resultado de adherencia que resulte puede variar por el efecto de fricción de los agregados pétreos, motivo por el cual el ensayo a tracción valora de manera más real el comportamiento funcional del riego de liga dentro del pavimento, aun cuando no sea la forma en que el riego de liga es sollicitado en el paquete estructural.

3. ANÁLISIS TENSIONAL DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

En base al ensayo de tracción se puede aplicar el método numérico de elementos finitos, simulando diferentes condiciones de carga, planteando que los materiales son homogéneos e isotropos, además de presentar un comportamiento elástico lineal.

Para obtener el mallado más satisfactorio en el procesamiento de datos a través de elementos finitos se debe aprovechar la simetría rotacional que presenta el ensayo a tracción tomando como eje de rotación al eje de aplicación de la carga, obteniendo así elementos triangulares extraídos de los anillos.

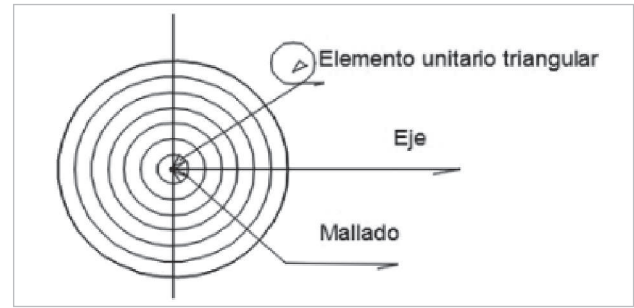
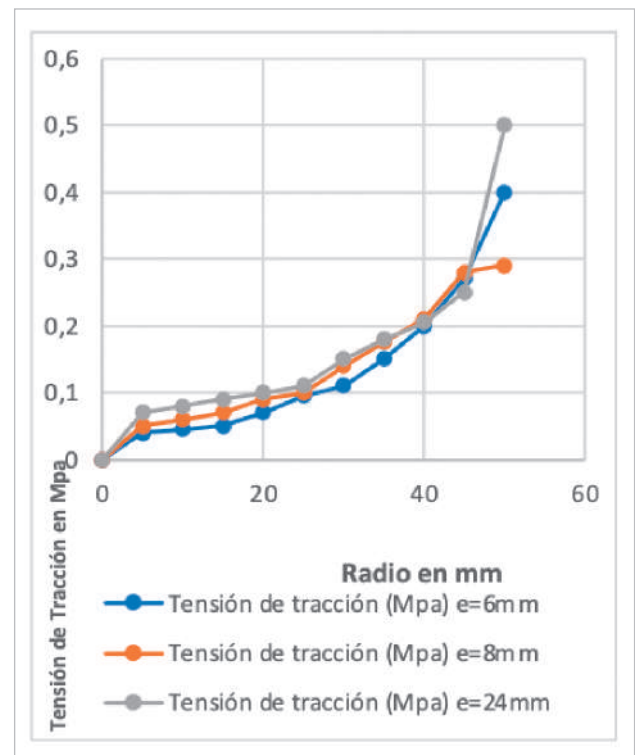


Figura 4: Mallado para análisis tensional

De acuerdo a lo sugerido como valor mínimo para el ensayo se considera una carga en las mordazas de 1570 N. que es el necesario para producir una tensión de tracción de 0.20 Mpa. Considerando los ensayos realizados, el patrón de esfuerzos tensionales en el riego de liga, varía de menos a más desde del centro de la probeta hacia la superficie, variando también de acuerdo a la distancia de aplicación de la carga de las mordazas, es decir que las tensiones que se presentan con separación mínima de mordazas son mayores a las que se presentan con mayor separación, considerando siempre al riego de liga en el centro de la distancia entre mordazas.

Gráfica 1: Tensiones de tracción de acuerdo a la separación entre mordazas



4. ANÁLISIS TENSIONAL DE LA INTERFASE E INCIDENCIA DE LA IMPORTANCIA DEL RIEGO DE LIGA EN LA VIDA ÚTIL DE UN PAVIMENTO

Dentro del análisis tensional de deformaciones se debe considerar que las capas se encuentran correctamente adheridas entre si y se evalúa las tensiones que debe resistir el riego de liga para garantizar la adherencia entre capas, analizando la distribución de los esfuerzos de corte a través del método de elementos finitos, con el desarrollo de una malla para el cálculo en la que se pueda definir diferentes paquetes estructurales bajo la carga del eje de un vehículo.

Correspondería realizar el análisis a dos tipos de carga, las máximas admisibles en nuestro país y las más usuales que serían:

Tabla 1: Pesos máximos admisibles

	PESO MÁXIMO PERMITIDO (TONELADAS)	PESO POR RUEDA (TONELADAS)
Eje sencillo de dos llantas	7,00	3,50
Eje sencillo de cuatro llantas	11,00	2,75

Fuente: VÍAS BOLIVIA – ADMINISTRADORA DE RODAJE Y PESAJE. LEY 441

Podemos identificar dos situaciones tipo que deberían considerarse para un análisis tensional del paquete estructural:

- Una primera alternativa considerando una base de concreto asfáltico con una carpeta de rodadura de concreto asfáltico. (óptimas condiciones)
- Una segunda alternativa considerando una base granular y carpeta de rodadura de concreto asfáltico

Como primer paso se debe realizar un análisis de sensibilidad al paquete estructural identificando la pérdida de vida útil considerando la adherencia entre capas. La Universidad Nacional de Rosario – Argentina, ha desarrollado un programa específico (BackVid), utilizando el método de la mecánica del continuo, que realiza el análisis de la vida útil de un pavimento por cada capa en función a criterios de falla definidos para cada una de ellas, en

función a un cálculo de tensiones (tensiones de tracción en capas cementadas), deformaciones (en capas asfálticas) y deformaciones verticales de compresión (en capas granulares).

Tabla 2: Relación de vida útil

ESTADO DE LA INTERFASE	VIDA ÚTIL			
	BASE ASFÁLTICA		BASE GRANULAR	
	espesor carpeta	espesor base	espesor carpeta	espesor base
	7	7	5	15
ADHERIDA	15		5	
NO ADHERIDA	4		2,5	
% RELACIÓN DE VIDA ÚTIL	26,67		50,00	

La anterior tabla nos muestra un ensayo realizado para ambas situaciones particulares, donde se observa que la caída de la vida útil de un pavimento sin adherencia entre capas reduce hasta en un 50% la vida útil del mismo considerando el caso más común en nuestro medio que es el de una base granular con una carpeta de rodadura con concreto asfáltico, demostrando así la importancia del riego de liga como elemento adherente en el paquete estructural.

El análisis tensional considerando las cargas de ejes de la tabla 1, deberán realizarse en el caso de rueda simple referida a su centro y en el caso de rueda doble referida al centro del conjunto.

El caso más común y desfavorable es el de base granular y carpeta asfáltica, revisando estudios realizados se ha identificado que variando espesores de carpeta asfáltica cambian también las tensiones de corte en el riego de liga, presentándose mayores esfuerzos a menores espesores de carpeta. Se han podido obtener valores que oscilan desde 0.3 a 0.75 Mpa.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con relación a la vida útil de un pavimento de concreto asfáltico considerando ambos casos, la adherencia entre capas es fundamental para garantizar la durabilidad del mismo. La situación más desfavorable corresponde a una base granular con una carpeta

asfáltica, cuyo orden de pérdida de vida útil alcanza hasta el 50% en caso de no garantizar la adherencia entre capas, motivo por el cual se debe normalizar los controles constructivos en la aplicación del riego de liga.

- Por otra parte, en el análisis tensional de la interface se identifica que las tensiones generadas en paquetes con base granular son mucho mayores a las que tienen base asfáltica, más aún cuando los espesores de carpeta van disminuyendo, coincidiendo este aspecto con la reducción de vida útil en esta combinación de suelo granular con asfalto a causa de una mala adherencia, razón por la cual es imprescindible garantizar una ligadura entre capas y un control adecuado de espesor de la carpeta que garantice una estructura durable a largo plazo.
- Asimismo, del análisis tensional se verifica que los mayores esfuerzos cortantes para el riego de liga se dieron para bases granulares con espesores delgados de carpeta, existiendo variación en las tensiones que son función de diferentes aspectos del ensayo a tracción tales como: ubicación y separación de las mordazas, obteniéndose mayores tensiones en los bordes en relación con el centro de la probeta.
- En resumen, la mala adherencia entre capas de una estructura de pavimento reduce en forma considerable la vida útil del mismo, por lo cual es necesario normalizar los estudios con relación al riego de liga, para efectos de control en obra, de manera que no se produzcan en nuestros pavimentos fallas tempranas que encarezcan el mantenimiento de las vías recién construidas.

Bibliografía

(s.f.).

Campana, P. (2002). Consideración de la Adherencia entre capas asfálticas en el análisis estructural. *XXXII reunión del Asfalto de la Comisión Permanente del Asfalto*. Buenos Aires - Argentins .

Giovanon, M. I. (2009). RIEGO DE LIGA Y SU IMPORTANCIA ESTRUCTURAL. *CARRETERAS*, 58-65.

P., E. M. (2001). *Metodos de Ensayos para Evaluar la Adherencia entre Capas de Pavimentos Flexibles*. Rosario - Argentina: Facultad de Ciencias Exactas U.N.R.



El aporte y el papel del sector de la construcción a los ODS y la agenda 2030 en Bolivia

Arancibia Carpio, J. C. ^a

^a Docente de la Asignatura de Preparación y Evaluación de Proyectos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: juancarlosarancibiacarpio@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo de investigación analiza el aporte y el papel de la construcción a los ODS y la agenda 2030. Desarrollando las siguientes actividades:

1. Se inició con la búsqueda de información relevante referidos al tema en cuestión para adecuar la metodología al contexto social donde se realiza la investigación.
2. Se verificó información referida al sector de la construcción, los ODS y la agenda 2030.
3. Se hizo una revisión de los ODS respecto al Sector de la Construcción a nivel Nacional y Local.

La investigación es de tipo exploratorio para conseguir información secundaria que permita familiarizarse con la temática de la investigación; posteriormente, la investigación se tornó descriptiva para plasmar la realidad del Sector de la Construcción de Bolivia. Para el estudio se tomó como muestra los ODS y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

El estudio consideró los 17 objetivos de los ODS y la Agenda 2030, las mismas que han sido objeto de estudio para tener mayor conocimiento de la realidad del Sector de la Construcción de Bolivia.

Para concluir, destacar la existencia de la Agenda Patriótica 2025 (AP) y el nuevo Plan de Desarrollo Económico y Social 2016-2020 (PDES) están vigentes y tienen un estrecho alineamiento con la nueva Agenda 2030 y los ODS.

Palabras clave: ODS, Agenda 2030.

ABSTRACT

This research work analyzes the contribution and role of construction to the SDGs and the 2030 agenda. Developing the following activities:

1. It began with the search for relevant information on the subject in question to adapt the methodology to the social context where the research is carried out.
2. Information regarding the construction sector, the SDGs and the 2030 agenda was verified.
3. A review of the SDGs was made regarding the Construction Sector at the National and Local level.

The research is exploratory in order to obtain secondary information that allows one to become familiar with the subject of the research; later, the research became descriptive to capture the reality of the Bolivian Construction Sector. For the study, the SDGs and the 2030 Agenda for Sustainable Development were taken as a sample.

The study considered the 17 objectives of the SDGs and the 2030 Agenda, the same ones that have been the object of study to gain a better understanding of the reality of the Bolivian Construction Sector.

To conclude, highlight the existence of the Patriotic Agenda 2025 (AP) and the new Economic and Social Development Plan 2016-2020 (PDES) are in force and are closely aligned with the new 2030 Agenda and the ODS.

Key words: SDG, Agenda 2030.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la sociedad internacional se enfrenta a un reto global, el cambio climático. La solución a dicho fenómeno significa la acción mancomunada de los diversos actores del sistema internacional entre ellos las empresas. Por tanto, es de vital importancia explicar y analizar el papel que juegan en la construcción y la implementación de la nueva agenda del desarrollo internacional contenida en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Teniendo en cuenta que el desarrollo sostenible surgió como una respuesta a los nocivos efectos del modelo de desarrollo y producción sobre la naturaleza, la coyuntura internacional fue justificando la inclusión de las empresas a través de alianzas público privadas, donde su participación se vio consolidada con la Agenda 2030 puesto que participaron de forma destacada en la construcción de los ODS.

En el proceso de consolidación de propuestas para definir los ODS, los grupos empresariales con el apoyo de la Organización de Naciones Unidas (ONU) entregaron una serie de informes donde se podría considerar que las empresas promovieron su visión de desarrollo.

Bajo este contexto, el siguiente artículo pretende ser un análisis sobre el tipo de desarrollo que se promueve desde esta agenda, si este responde con mayor ímpetu a las necesidades de la globalización de mercados al haber integrado a las empresas a sus estrategias de desarrollo desde la institucionalidad o, a los desafíos sociales y ambientales actuales. A partir de este objetivo, el análisis será guiado por la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué postura de la corriente de desarrollo sostenible han promovido las empresas del sector de la construcción a través de su participación en la construcción de los ODS?

Es oportuno mencionar que se parte de la siguiente suposición, la importancia que han adquirido las alianzas público- privadas y la construcción horizontal de propuestas en los temas de desarrollo han permitido que las empresas participen en la construcción de los ODS,

como actor para implementar y financiar las agendas desarrollo.

Dichas estrategias se traducen en el objetivo 12 Producción y consumo responsable, donde promueven sustentabilidad que antepone el crecimiento económico a las otras dimensiones como solución a la pobreza y al cambio climático.

Para lograr el objetivo de la investigación, se utilizaron fuentes primarias en especial, informes emitidos por las distintas redes y grupos empresariales que tuvieron participación en la construcción de los ODS y en la Asamblea General de Naciones Unidas y, secundarias como libros y artículos científicos.

El alcance de la investigación depende del relacionamiento de las fuentes con el enfoque de desarrollo sostenible, en especial con la visión crítica de la academia, pero la objetividad de este trabajo es fundamental por ello se recurrirá a la clasificación realizada por Ernesto Gudynas que permite abordar los diferentes enfoques que se le ha dado a la teoría de desarrollo sostenible, desde una visión economicista y antropocéntrica hasta el entendimiento del pensamiento ecologista.

La viabilidad de llevar a cabo esta investigación está justificada por diferentes razones: la primera, se apoya en la coyuntura en la que nos encontramos, donde los temas medioambientales toman fuerza al existir cada vez mayores efectos sobre el planeta Tierra. En segundo lugar, desde 2012 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible Río + 20, que culminó con la adopción del documento titulado El futuro que queremos, se aprueba la adopción de una lista de Objetivos del Desarrollo Sostenible, que tendrían su conclusión en 2013 y su implementación a partir de 2015; por último, la participación de las empresas en estos temas se torna crucial desde 2012, cuando la Organización de Naciones Unidas (ONU) promueve con mayor ímpetu las alianzas entre el sector empresarial y este organismo.

Este artículo pretende aportar un análisis más allá de los estados nación en el que comúnmente se encasilla a las relaciones internacionales, en especial, las investi-

gaciones que se han hecho en materia medioambiental, las cuales desconocen la influencia de actores como las empresas en la configuración del orden institucional e incluso, como una posible parte de la solución a esta problemática global.

Con este documento, se quiere hacer una invitación a la academia para promover el fortalecimiento del trabajo interdisciplinar que es tan necesario para plantear soluciones a los retos actuales, en especial a las ciencias sociales que desde su oferta académica parece desconocer su importante papel para abordar los problemas ambientales actuales.

Finalmente, es necesario reconocer que esta es una labor que tiene que abordarse desde un enfoque multidimensional con propuestas que reconozcan la necesidad del implementar un modelo de desarrollo alternativo donde no sé ignore la importancia de las realidades sociales y ambientales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se aplicó la investigación de tipo descriptivo exploratorio con el fin de obtener información secundaria que permita familiarizarse con la temática y problema de la investigación aplicando el método bibliográfico y analítico.

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

Una vez concluida la tabulación de los datos, con una vista de datos extensa, se procedió a obtener los resultados relevantes.

RESULTADOS

En el sector de la construcción también tenemos deberes: Los ODS nos los indican. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son los objetivos globales para erradicar la pobreza, luchar contra la desigualdad y la injusticia

y frenar el cambio climático entre otros. Estos objetivos fueron aprobados el 25 de septiembre del 2015 por la Asamblea general de Naciones Unidas como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible.

La nueva agenda (Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible) marcará la acción global para su desarrollo hasta el 2030, y junto con el resto de agendas globales (Nueva Agenda Urbana, Acuerdo de París sobre el cambio climático, la Agenda de Acción de Addis Abeba y el Marco de Acción de Sendai) configurarán la hoja de ruta de actuación para llegar a cumplir con el objetivo común: El Desarrollo Mundial Sostenible.

No se creería que el sector de la construcción podría tener un aporte para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la Agenda 2030, pero si tiene incidencia sobre la agenda de desarrollo mundial que se acordó en 2015.

Si bien alguien puede ver un edificio como una «simple construcción», en su interior, esconde la posibilidad de abordar problemas y combatir efectos adversos que preocupan a todo el mundo.

La industria de la construcción tiene un papel central cuando se trata de lograr los objetivos. Las construcciones ecológicas pueden ahorrar energía, agua y emisiones de carbono, crean empleos, mejoran la salud y el bienestar de las personas.

El World Green Building Council (WorldGBC) señala que el sector construcción tiene incidencia en nueve de los 17 ODS y además un impacto directo en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Humano.

No olvidemos que la Agenda 2030 es un compromiso adquirido en septiembre de 2015 a nivel internacional, y plantea 17 Objetivos (con 169 metas en total) que abarcan las esferas económica, social y ambiental.

Alcanzar los ODS significa afectar de manera positiva a una persona, un área, una ciudad, un país, un continente y poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas para 2030 gocen de prosperidad.

Cada uno de los 17 ODS son interdependientes, por lo que están interrelacionados unos con otros. Si bien cada uno de los 17 objetivos son diversos, hay varios ODS que el sector de la construcción puede contribuir:

- Salud y Bienestar (ODS 3)
- Agua limpia y saneamiento (6)
- Energía asequible y no contaminante (7)
- Trabajo decente y crecimiento económico (8)
- Industria, innovación e Infraestructura (9)
- Ciudades y comunidades sostenibles (11)
- Producción y consumo responsable (12)
- Acción por el clima (13)
- Vida de ecosistemas terrestres (15)
- Alianzas para lograr objetivos (17)

Cada uno de los 17 ODS tiene metas específicas que deben alcanzarse en los próximos 11 años.

SALUD Y BIENESTAR (ODS 3) GARANTIZAR UNA VIDA SANA Y PROMOVER EL BIENESTAR PARA TODOS EN TODAS LAS EDADES

Para lograr el desarrollo sostenible es fundamental garantizar una vida saludable y promover el bienestar para todos a cualquier edad. Se han obtenido grandes progresos en relación con el aumento de la esperanza de vida y la reducción de algunas de las causas de muerte más comunes – mortalidad infantil y materna -. Se han logrado grandes avances en el acceso al agua limpia y el saneamiento, en reducir la malaria, la tuberculosis, la poliomielitis y la propagación del VIH/SIDA. Sin embargo, se necesitan más iniciativas para erradicar por completo una gama de enfermedades y enfrentar a numerosas cuestiones persistentes y emergentes relativas a la salud.

La principal misión es garantizar vidas saludables y promover el bienestar para todos en todas las edades.

Y ahora hay evidencia que sugiere que una de las maneras de cumplir este objetivo es por medio del diseño de un edificio, ya que este puede afectar la salud y el bienestar de sus ocupantes o mejorarlo.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), las enfermedades pulmonares y respiratorias están asociadas con la mala calidad del ambiente interior y se posiciona como tres de las cinco principales causas de muerte.

Empero, se ha ido comprobando que las características de los edificios ecológicos, como la iluminación, calidad del aire y vegetación, podrían tener un impacto positivo en la salud y el bienestar.

AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO (ODS 6) GARANTIZAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUA Y SU GESTIÓN SOSTENIBLE Y EL SANEAMIENTO PARA TODOS

El agua libre de impurezas y accesible para todos es parte esencial del mundo en que queremos vivir. Hay suficiente agua dulce en el planeta para lograr este sueño. La escasez de recursos hídricos, la mala calidad del agua y el saneamiento inadecuado influyen negativamente en la seguridad alimentaria, las opciones de medios de subsistencia y las oportunidades de educación para las familias pobres en todo el mundo. La sequía afecta a algunos de los países más pobres del mundo, recrudece el hambre y la desnutrición. Para 2050, al menos una de cada cuatro personas probablemente vivas en un país afectado por escasez crónica y reiterada de agua dulce.

ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE (ODS 7) GARANTIZAR EL ACCESO A UNA ENERGÍA ASEQUIBLE, SEGURA, SOSTENIBLE Y MODERNA PARA TODOS

La energía es central para casi todos los grandes desafíos y oportunidades a los que hace frente el mundo actualmente. Ya sea para los empleos, la seguridad, el cambio climático, la producción de alimentos o para aumentar los ingresos, el acceso a la energía para todos es esencial.

La energía sostenible es una oportunidad – que transforma vidas, economías y el planeta.

El Secretario General de las Naciones Unidas Ban Ki-moon está a la cabeza de la iniciativa Energía sostenible para todos para asegurar el acceso universal a los servicios de energía modernos, mejorar el rendimiento y aumentar el uso de fuentes renovables.

El propósito de esta meta es garantizar el acceso a energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos.

Para lograrlo a través de los edificios verdes, se ha propuesto el uso de energía renovable, que puede ser más barata que las alternativas de combustibles fósiles.

La energía renovable además cuenta con una ventaja adicional al no producir emisiones de carbono, lo que limita el impacto en el planeta. La eficiencia energética junto con las fuentes renovables locales también mejora la seguridad energética.

TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO (ODS 8) PROMOVER EL CRECIMIENTO ECONÓMICO SOSTENIDO, INCLUSIVO Y SOSTENIBLE, EL EMPLEO PLENO Y PRODUCTIVO Y EL TRABAJO DECENTE PARA TODOS

Para conseguir el desarrollo económico sostenible, las sociedades deberán crear las condiciones necesarias para que las personas accedan a empleos de calidad, estimulando la economía sin dañar el medio ambiente. También tendrá que haber oportunidades laborales para toda la población en edad de trabajar, con condiciones de trabajo decentes.

Con este objetivo, se busca promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos.

Así que a medida que la demanda de construcción ecológica crece a nivel mundial, también lo hará la fuerza laboral requerida para entregarlos, y esta es otra meta a la que la construcción ecológica puede contribuir significativamente.

INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA (ODS 9) CONSTRUIR INFRAESTRUCTURAS RESILIENTES, PROMOVER LA INDUSTRIALIZACIÓN INCLUSIVA Y SOSTENIBLE Y FOMENTAR LA INNOVACIÓN

Las inversiones en infraestructura (transporte, riego, energía y tecnología de la información y las comunicaciones) son fundamentales para lograr el desarrollo sostenible y empoderar a las comunidades en numerosos países. El ritmo de crecimiento y urbanización también está generando la necesidad de contar con nuevas inversiones en infraestructuras sostenibles que permitirán a las ciudades ser más resistentes al cambio climático e impulsar el crecimiento económico y la estabilidad social.

Para este objetivo se tiene como principal meta construir infraestructura resistente, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.

Los edificios verdes pueden diseñarse de tal manera que permita garantizar que sean resistentes y adaptables frente al clima global. Esto ayudará a los países en desarrollo, ya que muchos serán particularmente susceptibles a los efectos del cambio climático.

Aunque no se trata solo de edificios a prueba de futuro, sino también de los espacios intermedios porque la infraestructura debe ser sostenible y resistente a los riesgos futuros.

CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES (ODS 11) LOGRAR QUE LAS CIUDADES Y LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS SEAN INCLUSIVOS, SEGUROS, RESILIENTES Y SOSTENIBLES

Son muchos los problemas que existen para mantener ciudades de manera que sigan creando empleos y prosperidad sin ejercer presión sobre la tierra y los recursos. Los problemas comunes de las ciudades son la congestión, la falta de fondos para prestar servicios básicos, la escasez de vivienda adecuada y el deterioro de la infraestructura.

El futuro que queremos incluye a ciudades de oportunidades, con acceso a servicios básicos, energía, vivienda, transporte y más facilidades para todos.

La misión de este ODS es hacer que las ciudades sean inclusivas, seguras, resistentes y sostenibles, sobre todo porque se calcula que casi el 60% de la población mundial vivirá en áreas urbanas para 2030.

Así que garantizar que las ciudades sean sostenibles será de suma importancia y los edificios se convertirán nuevamente en los cimientos de las ciudades, por lo tanto, los edificios verdes son clave para su sostenibilidad a largo plazo.

PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLE (ODS 12) GARANTIZAR MODALIDADES DE CONSUMO Y PRODUCCIÓN SOSTENIBLES

El consumo y la producción sostenibles consisten en fomentar el uso eficiente de los recursos y la eficiencia energética, infraestructuras sostenibles y facilitar el acceso a los servicios básicos, empleos ecológicos y decentes, y una mejor calidad de vida para todos.

El objetivo del consumo y la producción sostenibles es hacer más y mejores cosas con menos recursos, incrementando las ganancias netas de bienestar de las actividades económicas mediante la reducción de la utilización de los recursos, la degradación y la contaminación durante todo el ciclo de vida, logrando al mismo tiempo una mejor calidad de vida. También es necesario adoptar un enfoque sistémico y lograr la cooperación entre los participantes de la cadena de suministro, desde el productor hasta el consumidor final.

Para este objetivo se busca garantizar patrones de consumo y producción sostenibles.

En esta meta, la industria de la construcción tiene un papel importante que desempeñar en la prevención de desperdicios mediante la reducción, el reciclaje y la reutilización, así como promover los principios de la economía circular, donde los recursos no se desperdician.

ACCIÓN POR EL CLIMA (ODS 13) ADOPTAR MEDIDAS URGENTES PARA COMBATIR EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS

Las personas viven las consecuencias del cambio climático, como el aumento del nivel del mar y fenómenos meteorológicos más extremos. Las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por las actividades humanas hacen que esta amenaza aumente. La temperatura media de la superficie del mundo podría aumentar unos 3 grados centígrados este siglo y en algunas zonas del planeta podría ser peor. Las personas más pobres y vulnerables serán los más perjudicados.

El cambio de actitudes se acelera a medida que más personas están recurriendo a la energía renovable y a otras soluciones para reducir las emisiones. Las emisiones en un punto del planeta afectan a otros lugares lejanos. Es un problema que requiere que la comunidad internacional trabaje de forma coordinada y avance hacia una economía baja en carbono.

Aquí el objetivo se centra en tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos.

Diversos estudios comparten que los edificios generan más del 30% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, contribuyen en gran medida al cambio climático.

VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES (ODS 15) PROMOVER EL USO SOSTENIBLE DE LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES, LUCHAR CONTRA LA DESERTIFICACIÓN, DETENER E INVERTIR LA DEGRADACIÓN DE LAS TIERRAS Y FRENAR LA PÉRDIDA DE LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA

El 30% de la superficie terrestre está cubierta por bosques que proporcionan seguridad alimentaria y refugio, son fundamentales para combatir el cambio climático, porque protegen la diversidad biológica y las viviendas de la población indígena. Cada año desaparecen 13 millones de hectáreas de bosque y se degradan las zonas áridas provocando la desertificación de 3.600 millones de hectáreas.

La deforestación y la desertificación suponen grandes retos para el desarrollo sostenible y han afectado a las vidas y los medios de vida de millones de personas en la lucha contra la pobreza.

Este objetivo busca gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la desertificación, detener y revertir la degradación de la tierra, y detener la pérdida de biodiversidad.

En el caso de los edificios verdes, los materiales que componen un edificio son clave para determinar su sostenibilidad. La industria de la construcción y sus cadenas de suministro tienen un papel importante que desempeñar en el uso de materiales de origen responsable como la madera.

ALIANZAS PARA LOGRAR OBJETIVOS (ODS 17) FORTALECER LOS MEDIOS DE EJECUCIÓN Y REVITALIZAR LA ALIANZA MUNDIAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Para que una agenda de desarrollo sostenible sea eficaz se necesitan alianzas entre los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil, construidas sobre la base de principios y valores, una visión compartida y objetivos comunes que otorgan prioridad a las personas y al planeta.

Es preciso adoptar medidas urgentes encaminadas a movilizar, reorientar y aprovechar billones de dólares de recursos privados para generar transformaciones a fin de alcanzar los ODS con inversiones a largo plazo, en sectores fundamentales como la energía sostenible, la infraestructura y el transporte, así como las TIC. Deben fortalecerse los mecanismos nacionales de vigilancia, en particular las instituciones superiores de auditoría y la función de fiscalización que corresponde al poder legislativo

CONCLUSIONES

El sector de la construcción e ingeniería civil impacta sobre todas las esferas del desarrollo, incidiendo directamente sobre el bienestar social, el crecimiento y el fortalecimiento de la economía, la competitividad y el cuidado del entorno. La investigación destaca que las

empresas de construcción e ingeniería civil tienen una incidencia significativa sobre la Agenda 2030, especialmente sobre el ODS 7: Energía asequible y no contaminante, ODS 9: Industria, innovación e infraestructuras y el ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles. Sus actividades impactan principalmente en las metas 7.b enfocada en la mejora y ampliación de las infraestructuras y tecnologías vinculadas a la prestación de servicios energéticos, la meta 9.1 relativa al desarrollo de infraestructuras sostenibles fiables y resilientes y la meta 11.3 referente al incremento de los procesos de urbanización con un enfoque sostenible e inclusivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<https://www.bo.undp.org/>

<http://www.nu.org.bo/wp-content/uploads/2018/01/ODS-para-Vivir-Bien.pdf>

<http://www.nu.org.bo/agenda-2030/13912-2/>



Efecto de la tasa de carga isotrópica en ensayos triaxiales no saturados

Barahona, C.^a, Sandi, L.^b, Rojas, J.C.^c

^a Investigador laboratorio de Geotecnia. Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: Christian.Barahona@UGent.be, christianbarahona07@outlook.com

^b Estudiante de maestría en Geotecnia (USFX). E-mail: luissandiv@yahoo.com

^c Docente titular Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: geotecnia@gmail.com

RESUMEN

La presente investigación, describe los resultados de un estudio experimental sobre los efectos de la tasa de carga y velocidad de corte, en muestras de suelo parcialmente saturado, mediante la utilización de una versión de un equipo triaxial experimental. El plan de laboratorio consiste en una serie de ensayos triaxiales drenados (CD), en muestras parcialmente saturadas reconstituidas de suelo. Dicho material de ensayo, corresponde a un material granular con bajo porcentaje de finos, proveniente de la región de Sucre – Bolivia, clasificado como arena limosa (SM), de acuerdo al Sistema de Clasificación Unificado (USCS). Se utilizaron probetas remodeladas, mediante el método de apisonamiento de compactación en capas iguales.

Con el objetivo de estudiar las variaciones de volumen y de esfuerzo debido a la tasa de carga y velocidad de corte durante cada etapa de los ensayos triaxiales no saturados, se aplicaron dos tasas de carga distintas (32kPa/h y 128kPa/h) en las muestras, durante la etapa inicial de compresión isotrópica del ensayo triaxial. Posteriormente, en la etapa de corte de los ensayos, se consideraron dos velocidades de corte (0.5%/h y 2.5%/h) en condición drenada. Por otra parte, los ensayos drenados fueron realizados bajo condiciones de succión controlada constante (15kPa, 45kPa), gracias al control y medición independiente de la presión de poro agua y presión de poro de aire, permitiendo la utilización de la técnica de traslación de ejes.

Los resultados experimentales obtenidos durante la etapa de compresión isotrópica, muestran que las tasas de carga aplicadas, tienen un efecto no considerable en la variación de volumen específico de las muestras seleccionadas. Por otra parte, las velocidades de corte aplicadas en la fase de corte, presentan un leve incremento en el valor del esfuerzo de corte pico en la curva esfuerzo-deformación. Finalmente, los datos obtenidos fueron comparados con una investigación previa realizada por Rojas y Mancuso (2009), en la cual se emplearon, tanto valores similares de succión constante, como de tasas de carga y velocidades de corte.

Palabras clave: mecánica de suelos no saturados, ensayo triaxial, velocidad de carga, succión constante.

ABSTRACT

The present investigation describes the results of an experimental study on the effects of the loading rate and cutting speed, in partially saturated soil samples, using a version of an experimental triaxial equipment. The laboratory plan consists of a series of drained triaxial tests (CD), on reconstituted partially saturated soil samples. Said test material corresponds to a granular material with a low percentage of fines, from the Sucre region - Bolivia, classified as silty sand (SM), according to the Unified Classification System (USCS). Remoulded specimens were used, by means of the compaction tamping method in equal layers.

In order to study the volume and stress variations due to the load rate and shear speed during each stage of the unsaturated triaxial tests, two different load rates (32kPa / h and 128kPa / h) were applied to the samples. , during the initial isotropic compression stage of the triaxial test. Later, in the cutting stage of the trials, two cutting speeds were considered (0.5% / h and 2.5% / h) in drained condition. On the other hand, the drained tests were carried out under conditions of constant controlled suction (15kPa, 45kPa), thanks to the independent control and measurement of the water pore pressure and air pore pressure, allowing the use of the axis translation technique. .

The experimental results obtained during the isotropic compression stage show that the applied load rates have a not considerable effect on the variation of the specific volume of the selected samples. On the other hand, the cutting speeds applied in the cutting phase show a slight increase in the value of the peak shear stress in the stress-strain curve. Finally, the data obtained were compared with a previous investigation carried out by Rojas and Mancuso (2009), in which similar values of constant suction, as well as load rates and cutting speeds were used.

Keywords: unsaturated soil mechanics, triaxial test, load velocity, constant suction.

INTRODUCCIÓN

Las pruebas triaxiales de suelos en condiciones parcialmente saturadas, a diferencia de los suelos saturados, permiten el estudio de una gama más amplia de posibles condiciones de campo geotécnico bajo diferentes trayectorias de esfuerzos. La diferencia entre el comportamiento de un suelo saturado y no saturado, reside principalmente en la presencia de la succión en el caso de suelos parcialmente saturados. La succión de un suelo está compuesta de dos componentes: la succión matricial y la succión osmótica. Generalmente, la succión osmótica no está presente en los modelos constitutivos en suelos no saturados, mientras que la succión matricial es el componente que más influye en el comportamiento mecánico de los suelos. Entre los dos componentes de la succión, Fredlund y Rahardjo (1993) presentaron la importancia de la succión matricial en el comportamiento mecánico de los suelos insaturados. Al contrario de la succión osmótica, que tiene un efecto insignificante en la resistencia al corte del suelo (Katte y Blight, 2012). Esta succión matricial puede ser definida como la presión de poro de agua negativa respecto a la presión de poro de aire (Rahardjo et al., 2019).

El control triaxial de succión matricial en la muestra de suelo, se realiza generalmente por medio de la técnica de traslación de ejes (Hilf, 1956), utilizando sistemas separados de control de presión de aire y presión de poro de agua.

La mecánica clásica de suelos saturados describe la consolidación como la disipación de la presión del agua intersticial en el suelo y la deformación correspondiente en condiciones de carga constante, solo dependiendo de los parámetros de compresibilidad y permeabilidad. Por lo general, la teoría no tiene en cuenta la velocidad de carga. Por lo tanto, la implementación de pruebas de carga continua a diferentes velocidades permite el estudio de nuevos procedimientos y trayectorias de esfuerzos. La carga continua de suelos no saturados durante las pruebas triaxiales, generalmente se realiza durante la etapa de compresión (CRL), en condiciones de succión constante (controlada). Asimismo, la tasa constante de deformación (CRS) se utiliza durante la etapa de corte (desviador). Por otro lado, el enfoque de carga incremen-

tal (IL) consiste en una carga repentina y deformaciones de volumen rápidas en condiciones sin drenaje, que comprimen rápidamente el aire atrapado en los poros de suelo.

En cuanto a la literatura relacionada con las pruebas triaxiales de suelos parcialmente saturados y la tasa de carga, se muestra que los suelos arenosos no saturados de densidad media y alta densidad, tienen una propensión a mostrar dilatancia inducida por esfuerzos durante la prueba, seguida de un pico en el gráfico de esfuerzo cortante vs deformación y una fase posterior de ablandamiento, cuando se acerca al estado crítico. Alternativamente, los suelos arenosos sueltos tienen una compresión volumétrica durante la carga monótona, y un comportamiento de endurecimiento por deformación en la fase desviadora. Patil et al. (2015), realizaron varias pruebas triaxiales con el propósito de determinar las velocidades de corte adecuadas, concluyendo que velocidades de 0.054%/h eran apropiadas para estudios de alta succión en arenas limosas.

Rojas y Mancuso (2009), llevaron a cabo una serie de pruebas triaxiales con diferentes tasas de carga isotrópica y velocidades de deformación por corte, concluyendo que los efectos de las tasas de carga de consolidación en las muestras de arena piroclástica reconstituida, parecen ser insignificantes en el comportamiento durante la fase de compresión isotrópica.

Patil et al. (2014), mostró que las velocidades de corte lentas (0,174%/h) y medias (0,516%/h) en una arena limosa compactada, producían deformaciones volumétricas y tensiones desviadoras casi idénticas en las muestras. Sin embargo, la velocidad de corte más rápida (0,84%/h) provocó mayores deformaciones volumétricas y esfuerzos mayores de corte, lo que indica que dicha velocidad de deformación es insuficiente para disipar adecuadamente la presión de poro de aire y las presiones de poro de agua, bajo condiciones de drenaje en pruebas de succión constante.

En la presente investigación, se seleccionaron tasas de corte constante (CRS) adecuadas para pruebas triaxiales de un suelo no saturado (arena limosa) de 2.5(%/hr) y 0.5(%/hr).

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO TRIAXIAL

El equipo triaxial de suelos no saturados perteneciente a la Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca (Figura 1), desarrollado por Rojas (2006), en asociación con la empresa Megaris, es una variación del equipo triaxial original desarrollado por Bishop & Wesley (1975) y modificado por Rampino (1997). Entre las características más importantes del equipo, osee un sistema de doble drenaje con dos discos cerámicos HAEV de 5bar, fabricados por SoilMoisture, tanto en la base de la muestra como en la parte superior, lo cual permite una disminución en los tiempos de ensayo para cada muestra.



Figura 1. Equipo triaxial y módulo de control.

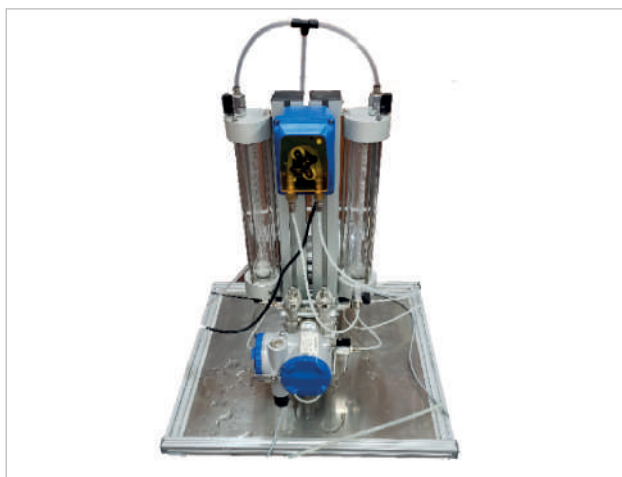


Figura 2. Sistema de medición de volumen.

DATOS DEL SUELO Y PROCEDIMIENTO

Se desarrolló un programa de pruebas de laboratorio para estudiar el efecto de la tasa de carga durante la etapa de compresión isotrópica y el efecto de la velocidad de corte durante la etapa de corte de la prueba triaxial. El diseño del programa de prueba se muestra en la Tabla 1.

	Succión matricial (kPa)	Esfuerzo neto (kPa)	Tasa de carga (kPa/h)	Velocidad de corte (%/h)
Compresión isotrópica	15	200	32	---
			128	
	45	200	32	---
			128	
Etapa de corte	15	200	32	0.5
				2.50
	45	200	32	0.5
				2.50

Tabla 1. Descripción del programa de ensayos

El suelo ensayado está clasificado como un suelo arenolimoso (SM), de acuerdo al Sistema de Clasificación Unificado (USCS), perteneciente a la región de Sucre-Bolivia, la Figura 3 describe su distribución de partículas.

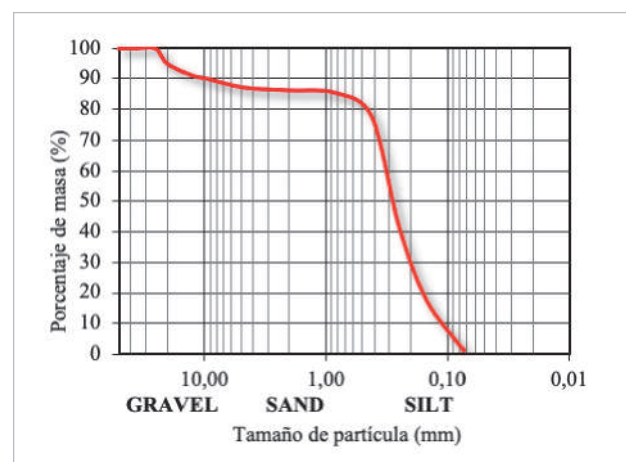


Figura 3. Descripción de sistema de medición de volumen.

USCS Clasificación	SM
Gravedad específica, G_s	2.67
Porcentaje de humedad, %w	8.00%
Relación de vacíos, e	0.48
Saturación, S	40.80%
Densidad, γ_w	19.44 kN/m ³
Densidad seca, γ_D	18.00 kN/m ³

Tabla 2. Descripción de parámetros del suelo analizado.

El programa de laboratorio se realizó en el suelo especificado bajo condiciones de compresión triaxial con succión matricial controlada de 15 y 45 kPa, a un esfuerzo neto de confinamiento promedio de 200kPa. Por otra parte, se tomó en cuenta dos velocidades de corte durante la fase deviatorica de 0.5%/h y 2.5%/h. Las muestras reconstituidas de 38mm de diámetro y 76mm de alto, fueron dinámicamente compactadas en base al método descrito por Ladd (1978), en 5 capas mediante un pistón y 25 golpes entre cada capa.

Figura 4. Descripción de muestra y herramientas de compactación.



Una vez compactada la muestra, es colocada cuidadosamente en el pedestal del triaxial encima el disco cerámico. Luego, se coloca una membrana de látex, al mismo tiempo que el cabezal con el disco cerámico superior es colocado y asegurado con "O-rings", tanto en la base como en la parte superior. Posteriormente, se coloca la celda interna de acero, la cual es llenada de agua desaireada hasta el nivel definido en el piezómetro. Finalmente, se instala la celda externa de acrílico y su malla de acero de seguridad, las cuales son aseguradas rígidamente con la tapa metálica del triaxial.

La muestra luego es sometida a una presión neta confinante (σ_3-u_a), y mediante el pistón del triaxial, se transmite un esfuerzo desviador aproximado de 5kPa, con el objetivo de confinar verticalmente a la muestra. Así como también, se procede a someter a la muestra a una succión matricial predeterminada (u_a-u_w), mediante la técnica de traslación de ejes. Se aplicaron presiones de poro de agua constantes de 30kPa en conjunto con presiones de aire de 45kPa y 75kPa, para obtener succiones de 15kPa y 45kPa respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primeramente, para que la muestra se encuentre en un estado de succión matricial constante, se aplican las presiones de agua y de aire, durante la fase de equalización, la cual es asumida como completada, cuando el volumen de flujo de agua a través del suelo, es casi nulo. Gracias al sistema de doble drenaje, los tiempos de equalización de las muestras son mucho menores en comparación a triaxiales de un solo drenaje (Rojas, 2006).

Una vez que las muestras se equalizaron en la succión inicial especificada (15 y 45 kPa), se realizaron etapas de compresión isotrópica hasta el valor máximo de confinamiento neto requerido (σ_3-u_a), mientras se mantiene la succión constante. Las tasas de carga aplicadas en las pruebas fueron 32 y 128 kPa/h. Para asegurar una disipación completa de las presiones de poro de agua y aire, cada muestra se consolida durante al menos 24-48h.

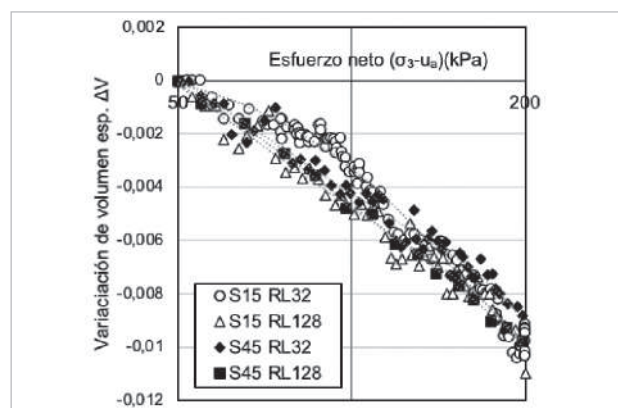


Figura 5. Variación de volumen específico en las muestras.

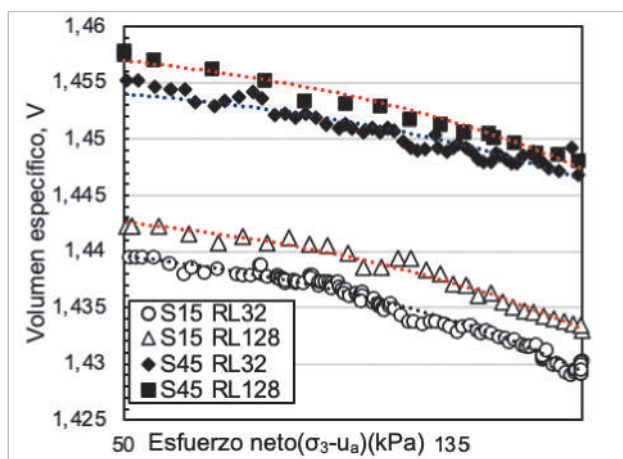


Figura 6. Volumen específico vs esfuerzo neto.

Muestra	Presión de preconsolidación p_0 (kPa)	Compresibilidad $\lambda_{(s)}$
S15 RL32	106	0.0107
S15 RL128	109	0.0105
S45 RL32	118	0.0095
S45 RL128	120	0.0094

Tabla 3. Descripción de parámetros del suelo analizado

La Figura 8 presenta el esfuerzo desviador (q) frente a la deformación axial (ϵ_a), para muestras de arena limosa compactada reconstituida durante las pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD), con succiones constantes de 15 kPa y 45 kPa. Así como también, se muestran los diferentes valores de deformación axial constante en la etapa de corte de cada ensayo (0.5 y 2.5%/hr). Las curvas de esfuerzo-deformación trazadas indican que la velocidad de deformación afecta significativamente la resistencia máxima al corte, mostrando un mayor aumento en la resistencia al corte en las muestras con una succión de 45 kPa (13,3%). Las muestras con una succión de 15 kPa presentan una variación del 9,5% en la resistencia máxima en ambas velocidades de deformación.

Por el contrario, los resultados presentados por Rojas y Mancuso (2009), de pruebas experimentales bajo valores de succión y velocidades de corte similares, mostraron un aumento mínimo en la resistencia al corte que podría ser descrito por el autor como variaciones

experimentales normales. En contraste con los resultados observados por Patil et al. (2014), que mostraron un aumento de las resistencias máximas al corte bajo velocidades de deformación más rápidas de 0.014%/min en comparación con tasas más lentas de 0.0029%/min. Por otra parte, se observa un comportamiento frágil en los gráficos de deformación cortante, ya que la resistencia al corte disminuye repentinamente después de la ruptura de las muestras bajo una carga axial monótona. Generalmente, el valor de la deformación axial al que tienden a fallar las probetas es del 2-3,5%.



Figura 7. Rotura de muestra.

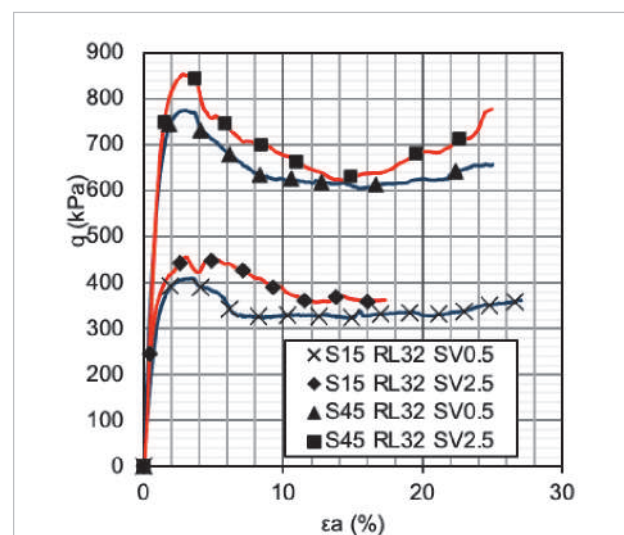


Figura 8. Gráfica q vs ϵ_a de muestras.

Como se observa en la Figura 8, el comportamiento de la deformación volumétrico-axial, muestra un aumento re-

pentino en el cambio de volumen, lo que indica la ruptura de cada espécimen durante la fase de corte. Los saltos de deformación volumétrica, se observan en los mismos valores de deformación axial donde se produce la resistencia máxima al corte en las muestras ensayadas. Este comportamiento volumétrico es diferente a los estudios presentados por Patil et al. (2014), Cattoni et al. (2007) y Rojas y Mancuso (2009), lo que indica una respuesta frágil del suelo analizado. Las muestras cargadas con la velocidad de deformación más rápida de 2,5%/h, muestran mayores cambios volumétricos a lo largo de la falla de corte, a diferencia de las muestras con velocidades de deformación más bajas (0,5%/h).

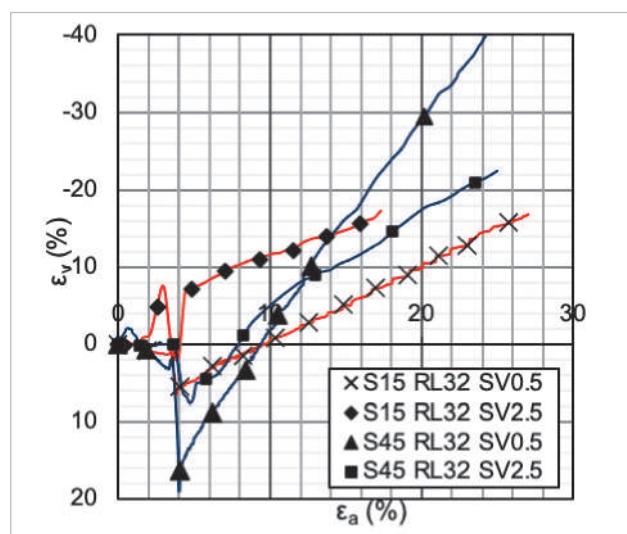


Figura 9. Gráfica de deformación volumétrica (ϵ_v) vs deformación axial (ϵ_a).

CONCLUSIONES

En esta investigación, se analiza un suelo parcialmente saturado de la región de Sucre (Bolivia), mediante pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD) en muestras reconstituidas bajo succiones constantes de 15 kPa y 45 kPa. Se seleccionaron tasas de carga isotrópicas apropiadas de 32 y 128 kPa/hr de acuerdo con trabajos previos de Rojas & Mancuso (2009), bajo valores de succión similares. Los cambios de volumen se midieron durante cada etapa triaxial. Los resultados obtenidos del corte bajo diferentes velocidades de deformación de 0.5 y 2.5%/hr, hicieron posible el estudio del comportamiento tensión-deformación del material reconstituido

seleccionado. Se observa que, bajo valores de succión bajos de 15 y 45 kPa, las variaciones de volumen específicas y la compresibilidad (λ_s) son consideradas insignificantes para diferentes tasas de carga, como se indica también en estudios anteriores de Rojas y Mancuso (2009). Sin embargo, el nivel de succión parece tener un efecto creciente sobre la presión de preconsolidación (p_0) y una disminución en la compresibilidad con mayor succión matricial.

Con base en los resultados obtenidos de las etapas de corte para el material reconstituido, la rigidez inicial y la resistencia máxima al corte son mayores en las muestras con 45 kPa de succión. La comparación entre los gráficos de tensión-deformación de ambas velocidades de corte (0,5% y 2,5%/hr) mostró un efecto significativo sobre el esfuerzo cortante desviador pico en las muestras. El esfuerzo máximo de corte a una velocidad de deformación del 2,5%/h es mayor que en el caso de la tasa de 0,5%/h. Por otro lado, el comportamiento de la deformación volumétrico-axial, muestra un gran cambio volumétrico bajo el mismo valor de deformación axial donde ocurre la falla por corte, lo que indica un comportamiento frágil de cada muestra de suelo.

Las diferencias de los resultados experimentales en condiciones de succión constantes similares, tasa de carga y deformación entre los estudios anteriores de Rojas y Mancuso (2009), pueden explicarse por las propiedades del material ensayado seleccionado, como la relación de vacíos inicial (e), la distribución granulométrica y la mineralogía, así como las diferentes técnicas de preparación de muestras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bishop A.W. & Donald, I.B. (1961). The experimental study of partly saturated soil in triaxial apparatus. *Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1:3, 13–21.
- Bishop, A.W., Wesley, L.D. (1975). A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Geotechnique*, 25, 657–670.

Cattoni, E., Cecconi, M. y Pane, V. (2007). Geotechnical properties of an unsaturated pyroclastic soil from Roma. *Bulletin Of Engineering Geology And The Environment*, 66:4, 403-414. doi: 10.1007/s10064-007-0096-z

Edil, T.B., Motan, S.E., Toha, F.X. (1981). *Mechanical behavior and testing methods of unsaturated soils*. Yong, R.N., Townsend, F.C. (eds.) Laboratory Shear Strength of Soil. ASTM STP 740, 114–129

Fredlund D.G. & Rahardjo H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley, New York.

Ladd R. (1978). Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1:1, 16-23, doi: 10.1520/gtj10364j

Laloui, L., Péron, H., Geiser, F., Rifa'i, A., Vulliet, L. (2006). Advances in volume measurement in unsaturated soil triaxial tests. *Soils and Foundations*, 46:3, 341–349.

Rojas Vidovic J. C. & Mancuso C. (2009). Effect of loading rate on the behaviour of unsaturated soils. *Proceedings Of The 17Th International Conference On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering*, 17:1-4, 761-764, doi:10.3233/978-1-60750-031-5-761

Katte V. & Blight G.E. (2012). The roles of surface tension and solute suction in the strength of unsaturated soils. *Unsat 2012 Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Naples, Italy, p. 5

Wheeler, S.J. (1988). The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles. *Geotechnique*, 38, 399–413



Tecnología DHS 3g (downflow hanging sponge) como etapa secundaria para tratamiento de aguas residuales

Vacaflor, M.^a

^a Ingeniero Civil - Mención Hidráulica Sanitaria U.M.R.P.S.F.X.CH., E-mail: roci.vaca97@gmail.com.

RESUMEN

La tecnología DHS traducida al español como “Esponjas Colgantes de Flujo Descendente” es una propuesta novedosa japonesa para un tratamiento secundario aerobio precedido por un tratamiento primario anaerobio, dicha tecnología sigue el concepto funcional de un filtro biológico cuyo medio de soporte ahora será la esponja de poliuretano la cual se encarga de realizar la depuración de las aguas residuales sin necesidad de ocupar gran espacio, requerir de una gran inversión ni necesitar un mantenimiento complejo. En el presente estudio, se implementó la tecnología DHS 3G a través de un piloto que trate parte del efluente del tratamiento primario tanques Imhoff de la P.T.A.R. de Sucre, los resultados obtenidos durante de evaluación del piloto nos llevan a concluir que la tecnología DHS es una nueva alternativa, propuesta para emplearla en futuros diseños de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, tecnología DHS, piloto DHS 3G.

ABSTRAT

The DHS technology translated into Spanish as “Esponjas Colgantes de Flujo Descendente” is a novel Japanese proposal for an aerobic secondary treatment preceded by an anaerobic primary treatment, said technology follows the functional concept of a biological filter whose support medium will now be the sponge of polyurethane which is responsible for the purification of wastewater without the need to occupy a large space, require a large investment or need complex maintenance. In the present study, DHS 3G technology was implemented through a pilot that treats part of the effluent from the primary treatment Imhoff tanks of the P.T.A.R. of Sucre, the results obtained during the pilot evaluation lead us to conclude that DHS technology is a new alternative, proposed for use in future designs of wastewater treatment plants

Key words: wastewater treatment, DHS technology, pilot DHS 3G.

INTRODUCCIÓN

La tecnología DHS (Downflow Hanging Sponge) es una propuesta planteada por el profesor Harada Hideki en la Universidad de Tecnología de Nagaoka – Japón, con el fin lograr un sistema de tratamiento de aguas residuales municipales autosustentable para países en vías de desarrollo.

El DHS consiste en una propuesta a un post-tratamiento aerobio al que le antecede un tratamiento primario anaerobio (UASB), otorgando con el sistema D.H.S. la ventaja de ser simple, compacto, de fácil operación, mantenimiento, económico en energía, factible técnica y económicamente.

La tecnología DHS empezó a ser investigada por los años 1995 con las esponjas de primera generación y desde entonces el estudio y evolución de las esponjas en cuanto a su tamaño y forma para mejorar la eficiencia en los resultados, mantenimiento y duración de las mismas en el reactor hizo que se obtuvieran distintas generaciones de esponjas.

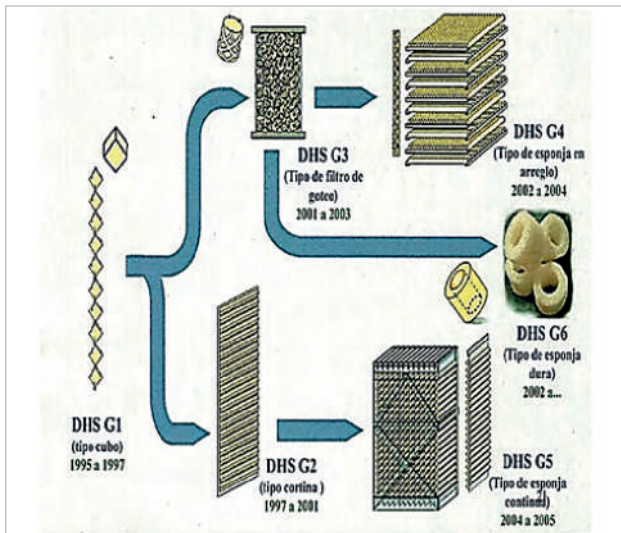


Figura 1 Generaciones de Esponjas

Desarrollo de la tecnología DHS

Sin necesidad de aireación externa

El no requerir de un sistema de aireación externo es una de sus mayores ventajas para el tema económico, esto se explica debido a que se deja un espacio de unos 10

mm entre las esponjas consecutivas del DHS haciendo que se mantenga la difusión natural de aire en las aguas residuales.

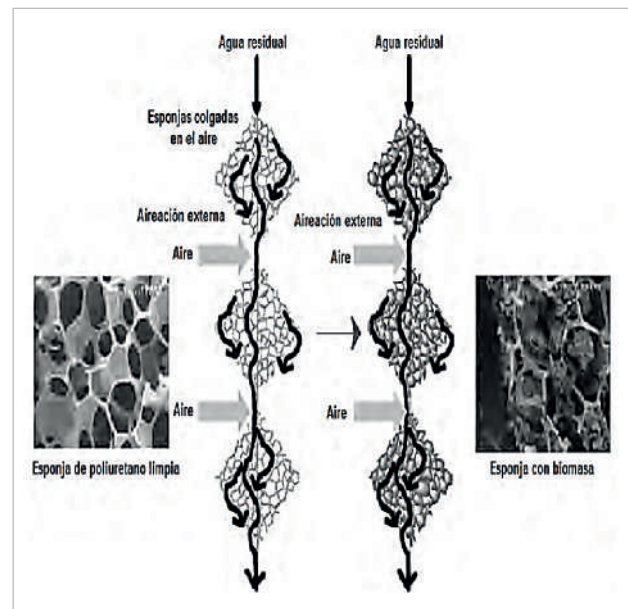


Figura 2 Concepto funcional DHS – Sin aireación externa

Retención de lodos

Gracias al gran porcentaje de porosidad que tienen las esponjas de poliuretano se logra atrapar en los mismos grandes volúmenes de biomasa, permitiendo que el tiempo de retención de lodo del sistema se prolongue, teniendo como resultado una producción de lodo en exceso despreciable.

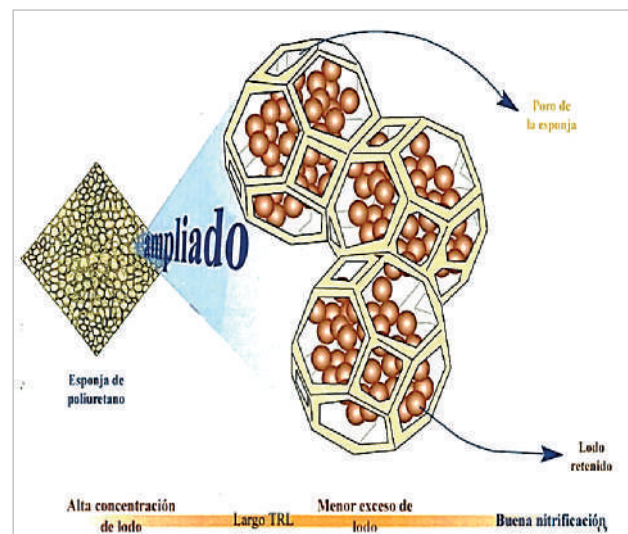


Figura 3 Concepto funcional DHS – Retención de lodos

Condiciones aerobias – anóxicas

El DHS también es único que logra el mantenimiento de las condiciones aeróbicas y anóxicas en la esponja. Esto permite la nitrificación y desnitrificación simultánea en un sistema sencillo. Las investigaciones demostraron que la zona aeróbica de la esponja existe hasta una profundidad aproximada de 10 mm desde la superficie de la esponja, a partir de esta profundidad se ingresa en la zona anóxica.

Comportamiento de la profundidad del reactor

Analizando la figura 4, se observa como la carga orgánica se reduce a medida que la concentración del oxígeno disuelto aumenta en el reactor DHS y se obtienen resultados aún mejores a medida que es mayor la profundidad del reactor.

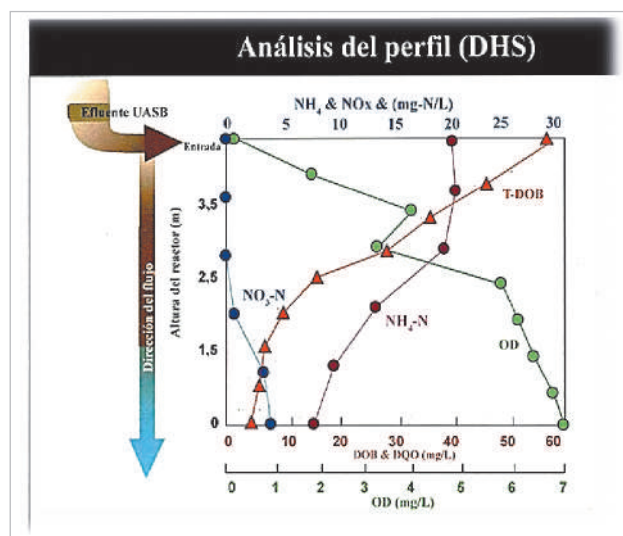


Figura 4 Análisis Perfil DHS

Beneficios de la tecnología DHS

- Es de fácil construcción, operación y mantenimiento.
- No hay necesidad de aireación externa.
- Requiere de menos área de construcción.
- Presenta una cantidad despreciable de lodo en exceso.
- Alto rendimiento a un bajo T.R.H. (Tiempo de retención hidráulica).

Conociendo lo primordial sobre el desarrollo y funcionamiento de esta propuesta novedosa. Se pudo implementar la tecnología DHS en nuestro medio mediante el diseño y construcción de un piloto con esponjas de tercera generación que trate parte del caudal del efluente del tratamiento primario de las aguas residuales que ingresan a la P.T.A.R. El Campanario de la ciudad de Sucre y con los resultados de la etapa de evaluación ver cuáles son las eficiencias obtenidas y como esta tecnología se desenvuelve con condiciones del medio, para poder proponerla en el futuro diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales en ciudades con condiciones similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la planta piloto

Para la realización del proyecto se requiere del efluente de un tratamiento primario en condiciones anaerobias, por esta razón se emplea el efluente del tratamiento primario (tanques Imhoff) de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Sucre, que se encuentra ubicada en el departamento de Chuquisaca, provincia Oropeza, a 8 Km de la ciudad de Sucre, sobre la carretera Sucre – Potosí, en cercanías de la comunidad del Campanario.

La ubicación para la instalación de la planta piloto, estará colindante a los estanques de salida del efluente de los tanques Imhoff, de donde se captará parte del caudal del efluente del tratamiento primario para poder tratarlo con la tecnología DHS 3G.



Figura 5 Ubicación del Piloto DHS 3G

Criterios para el diseño del Prototipo DHS

Para el diseño de los reactores DHS se escoge

las esponjas de tercera generación, por presentar los mayores porcentajes de eficiencia en remoción de DBO₅, DQO y SST en las investigaciones realizadas, además de contar con una muestra proveniente del Japón.

Tiempo de Retención Hidráulica (T.R.H.)

Es uno de los parámetros base para el diseño del reactor DHS, define el tiempo que tiene la película biológica que se encuentra adherida en las esponjas para realizar la depuración de las aguas residuales, se calcula considerando la siguiente ecuación:

$$T.R.H. = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

Dónde: T.R.H.= Tiempo de Retención Hidráulica (h), Q = Caudal de diseño (m³/h), V = Volumen de agua (m³).

Se consideró un periodo de retención hidráulica de 2,7 h (2 h y 42 min.), parámetro que es adoptado de la tabla de funcionamiento del proceso de las variantes DHS en Nagaoka para esponjas de tercera generación.

	DHS G1	DHS G2	DHS G5	DHS G3	DHS G4	DHS G6
HRT (h)	2,3	2	2,5	2,7	2	2
Eliminación de DBO ₅ (%)	97	96	95	98	96	96
Eliminación de DQO (%)	94	84	90	93	91	93
Eliminación de SS (%)	98	68	95	92	93	95
Eliminación de NH ₄ -N (%)	75	64	60	86	28	75
Eliminación de col. Fecales (log 10)	-	2,7	4,0	2,6	3,5	2,8
SRT (d)	-	90-100	90-125	-	100-125	-100
Ocupación de esponja (%)	-	25	55-57	38	38	34

Figura 6 Resultados obtenidos del funcionamiento de las variantes DHS

Selección del material filtrante

Para la selección del material filtrante se seleccionaron distintos tipos de esponjas ofertados en el mercado y

junto con la esponja original del Japón se sometieron a los ensayos de peso específico y porosidad, esto permitió la selección de aquella esponja de poliuretano con las condiciones más similares a la esponja original.

Tabla 1. Resultados Esponja Seleccionada

	POROSIDAD %	PESO ESPEC. gr/cm ³
E. Original	61,24	0,021
E. Tipo 5	56,95	0,017

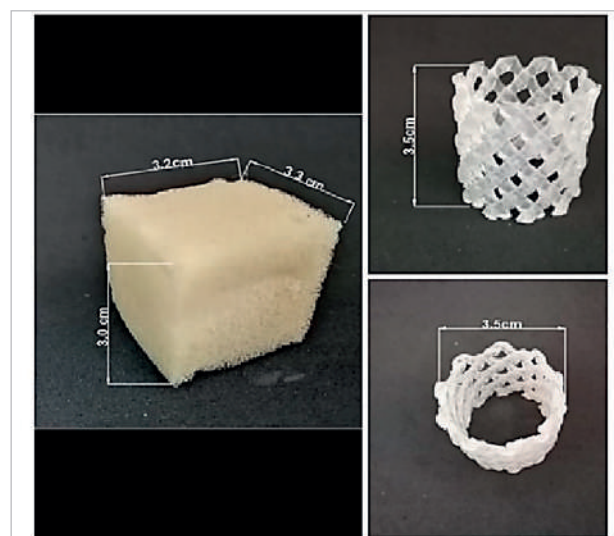


Figura 7 Esponja 3G y su material de soporte

Caudal de diseño

Se determinó emplear un gasto diario de 20 L/d por cada reactor, el mismo será captado del efluente de los tanques Imhoff.

Volumen de agua efectivo

El volumen efectivo de agua se obtiene de despejar de la ecuación de T.R.H., posteriormente para obtener el volumen que

ocupan las esponjas se deberá dividir el volumen efectivo entre la porosidad de la esponja seleccionada, recordando que según la figura 6 para esponjas de tercera generación el volumen que ocupan las esponjas corresponde al 38% del volumen total del reactor.

Número de esponjas por cada reactor

Para obtener el número de esponjas que compone cada reactor se divide el volumen ocupado por las esponjas entre el volumen que ocupa cada esponja, en el caso de la de tercera generación el volumen que ocupa el material de soporte.

Se proponen dos alturas distintas para el dimensionamiento de los reactores DHS, esto con el objetivo de ver de qué manera influye la altura del reactor en la eficiencia del mismo, teniendo a continuación la tabla resumen del dimensionamiento de los reactores.

Tabla 2. Resumen diseño reactores DHS 3G

REACTOR 1			
Caudal	=	20	L/d
Tiempo de retención hidráulica	=	2,7	h
Volumen del tanque	=	0,01	m ³
Nº de Esponjas	=	117	Unid.
Altura del tanque	=	1	m
Diámetro del tanque	=	0,12	m
REACTOR 2			
Caudal	=	20	L/d
Tiempo de retención hidráulica	=	2,7	h
Volumen del tanque	=	0,01	m ³
Nº de Esponjas	=	117	Unid.
Altura del tanque	=	0,6	m
Diámetro del tanque	=	0,15	m

Se adicionó a la salida de ambos reactores un sedimentador secundario esto con el fin de ayudar a estabilizar mejor las partículas en suspensión del efluente.

Para el proyecto consistieron en dos recipientes plásticos transparentes con capacidad de 6 litros, habiendo trabajado con un volumen de agua de 2,79 L. y un tiempo de retención hidráulica de 3,36 h.

ETAPAS DENTRO DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

El piloto con tecnología DHS 3G, se puso en marcha por un periodo de 14 días en el que se subsanaron algunas falencias y acondicionaron algunas mejoras con el fin de garantizar un buen desarrollo de la tecnología, entre las más importantes mencionar que esta tecnología funciona en ausencia de luz, para evitar la propagación de algas, se optó por cubrir ambos reactores y sedimentadores con malla atrapa sol oscura, así mismo se añadió una malla milimétrica al ingreso de cada reactor para evitar el ingreso de vectores y que estos no permitieran un buen desarrollo de biopelícula en las esponjas.

Posteriormente se inició el periodo de evaluación de la planta piloto, durante un periodo de más de dos meses en donde ya se pudo realizar análisis en laboratorio y la medición de algunos parámetros que se utilizaron como referencia para ver los resultados del proyecto.

Los parámetros evaluados de mayor importancia y a los que haremos referencia en el presente artículo son: pH, OD, DBO₅, DQO,

SST. Los puntos de muestreo seleccionados fueron tres: **ER** (entrada a los reactores), **R1** (efluente reactor R1), **R2** (Efluente reactor R2)



Figura 8 Piloto DHS 3G

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la etapa de evaluación donde se realizaron los ensayos en laboratorio se obtuvieron los siguientes resultados:

pH

De los resultados obtenidos se observa que el efluente de los reactores cuenta con un pH promedio de 7,5 y 7,6, valores que están dentro de la Ley Boliviana 1333, nos indica que las aguas tratadas por R1 y R2 se encuentran en un valor neutral y también es un indicativo de que se tienen las condiciones para que ocurra la desnitrificación en ellas.

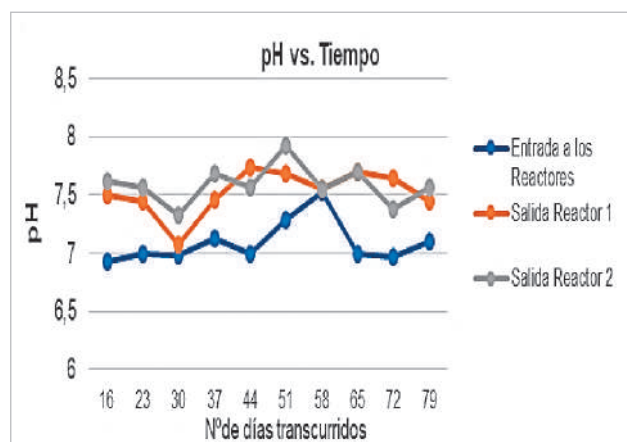


Figura 9 pH vs. Tiempo

Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto presenta valores máximos, mínimos como promedios, se puede apreciar, cómo a medida que el tiempo transcurre el oxígeno disuelto se va incrementando hasta mantenerse constante en un rango de 4-6 mg/L OD demostrando que sin la necesidad de aireación externa se mantiene una buena concentración de OD y asegurando que ocurre la nitrificación.

Tabla 3. Valores máximos, mínimos y promedio del Oxígeno Disuelto

	OD.MÁX.	OD.MÍN.	OD.PROM.
ER	0	0	0
R1	5,4	3,1	4,4
R2	4,6	0,6	3,8

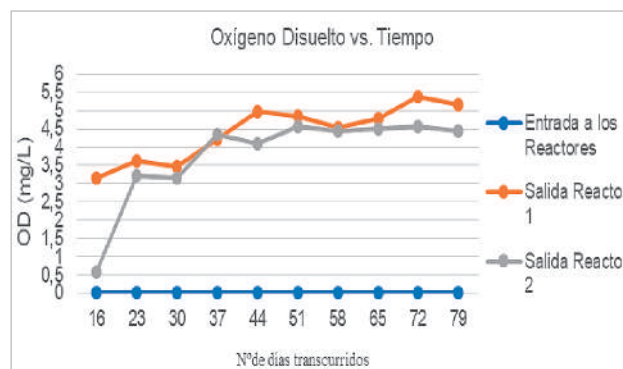


Figura 10 Oxígeno Disuelto vs. Tiempo

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La DBO₅ fue reduciéndose considerablemente a medida que la biopelícula se fue formando en las esponjas, dando resultados constantes a partir del día 50 de puesto en marcha el piloto.

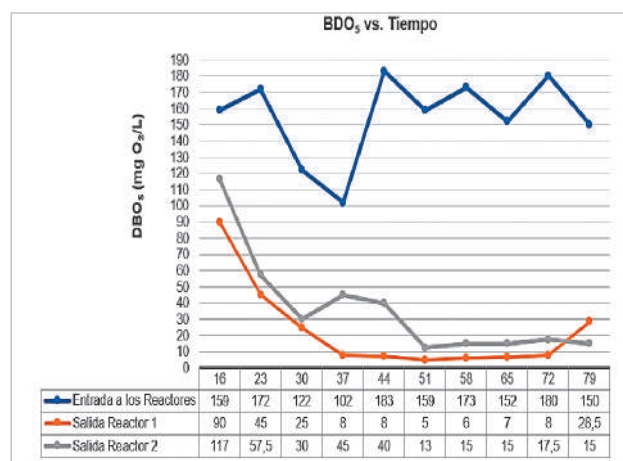


Figura 11 DBO₅ vs. Tiempo

En el reactor R1 se obtuvo un valor promedio de DBO₅ de 22,3 mg O₂/L. En el reactor R2 los resultados que se obtuvieron dan un valor promedio de 38,8 mg O₂/L.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Durante el tiempo de evaluación se observa que a la salida del reactor R1 la DQO tuvo un valor promedio de 89,6 mg O₂/L y en el reactor R2 tuvo un valor promedio de 102,5 mg O₂/L.

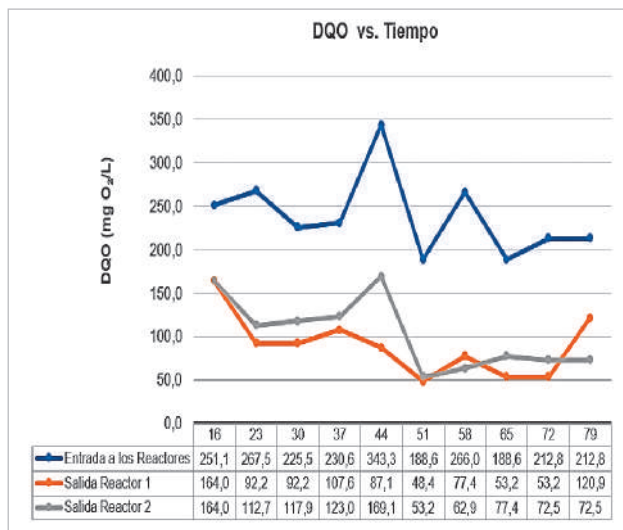


Figura 12 DQO vs. Tiempo

Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los resultados de los Sólidos Suspendidos Totales en ambos reactores no fueron constantes a lo largo del periodo de evaluación, cerca de los 65 días de evaluación logran estar dentro del cumplimiento de la Ley 1333.

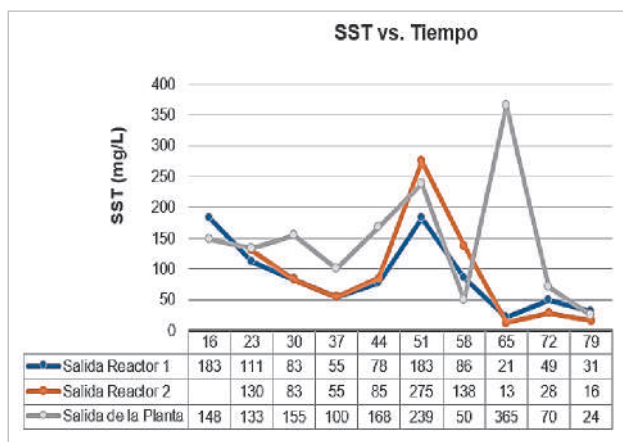


Figura 13 SST vs. Tiempo

Eficiencia del piloto DHS 3G

Con los resultados obtenidos durante el periodo de evaluación se calcularon las eficiencias de remoción de carga que logró alcanzar el piloto, tanto para el reactor R1 como para R2. Para el cálculo se empleó la ecuación.

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{E-S}{E} \times 100 \quad (2)$$

Donde: E=Carga contaminante de entrada (mg O₂/L), S=Carga contaminante de salida (mg O₂/L).

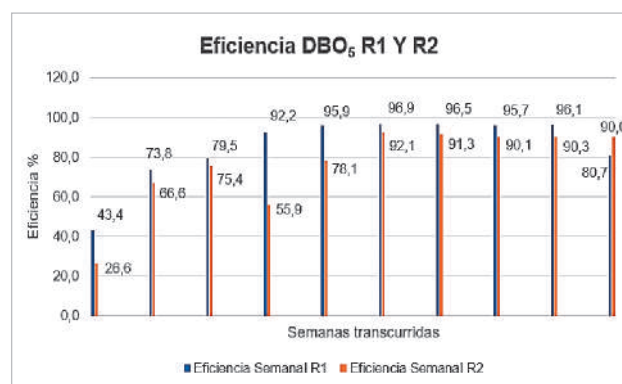


Figura 14 Eficiencia DBO₅ del piloto DHS 3G

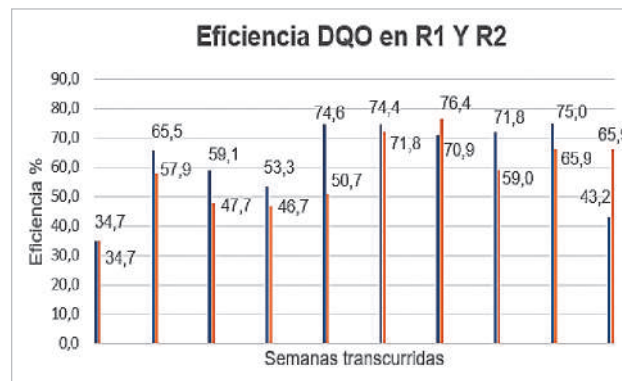


Figura 15 Eficiencia DQO del piloto DHS 3G

En cuanto a la eficiencia en remoción de DBO₅ el reactor R1 obtuvo una eficiencia promedio mensual máxima de 95,36 %, en tanto que en el reactor R2 fue de 90,14 %, hablando de la eficiencia en DQO el promedio mensual máximo en R1 fue de 68 % y en R2 se obtuvo un valor de 63,6 %.



Figura16 Efluentes de R1 Y R2

Coliformes fecales

Se realizaron los ensayos microbiológicos únicamente para el reactor R1 durante el último mes de valuación, con el propósito de ver la eficiencia en remoción de coliformes fecales que tiene el reactor con mayor eficiencia en remoción de carga.

Las eficiencias obtenidas superan el 90 % en remoción de coliformes, pero no se cumple con el límite establecido en la ley 1333 que rige en nuestro país el cual nos indica un máximo de 1000 NMP/100 ml.

Tabla 3. Resultados Coliformes fecales R1

Entrada a la Planta NMP/100 ml	Salida R1 NMP/100 ml	Eficiencia (%)
2,33E+07	1,95E+05	99,16
5,75E+06	1,15E+05	98,00
2,33E+07	1,95E+05	99,16
6,00E+07	7,50E+05	98,75

Los resultados del presente proyecto presentan valores que se encuentran dentro de la ley que rige para nuestro medio, muy por debajo del límite permisible, realizando un análisis comparativo de los resultados obtenidos con los que se encuentran en bibliografía sobre el monitoreo de la planta piloto a escala real construida en Karnal India por el año 2002 a cargo del profesor Harada, se obtienen eficiencias cercanas, las del piloto de la India obtuvo eficiencias de 96% en DBO₅ y 92% en DQO.

En el país vecino del Perú que presenta condiciones similares a nuestro medio como ser el clima, se elaboraron algunas tesis con tecnología DHS de otras generaciones las cuales alcanzan resultados similares en cuanto a la eficiencia en remoción de carga, pero resultados más óptimos en cuanto a la remoción de coliformes.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos durante la etapa de evaluación del piloto, se puede concluir que es posible la implementación de la tecnología DHS 3G en nuestro medio con la esponja de porosidad 56,95 % y peso específico de 0,017 gr/cm³.

En el reactor R1 se obtuvieron eficiencias en remoción mayores a R2. Demostrando así que a mayor altura en el reactor mayor es la degradación de materia orgánica en las aguas residuales.

El tiempo de retención hidráulica de 2,7 h adoptado para la tecnología D.H.S. 3G es suficiente para que el Oxígeno Disuelto (OD) se incremente y se realicen los procesos biológicos y de nitrificación a medida que la biopelícula se forma en las esponjas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Castro, A.,Castillo, D., & Steven, H., (2012). Estudio del Sistema Downflow Hanging Sponge (DHS) Tipo bloques prismáticos en el tratamiento del efluente del Reactor Anaerobio de Manto de Lodos y Flujo Ascendente. Tesis para optar el título profesional. Universidad Nacional e Ingeniería. Recuperada de:

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_47c-7fcfaa555972b6db5478834d8c841/Description#tabnav

Japón International Coperación Agency. 2015. Tecnología del sistema UASB+DHS del tratamiento de aguas residuales de bajo costo y mínimo consumo de energía aplicables en los países en vías del desarrollo. Japón.:Autor.

Mahmoud, M., Tawfik, A. & El-Gohary F. (2011). Use of down-flow hanging sponge (DHS) reactor as a promi-

sing post-treatment system for municipal wastewater. [Versión Electronica]. Chemical Engineering Journal, 168(2011), 535-543.

Ossio, V. & Acuña, T.J. (2013). Eficiencia del sistema de esponjas colgantes DHS de primera generación en el tratamiento del efluente del Reactor UASB. Tesis para optar el título profesional. Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperada de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_7e1d64207b33c3ed7f4c36fb143282af

Universidad de Tohoku. 2007. Introducción a la tecnología sostenible del tratamiento de aguas residuales mediante el Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB) y el Reactor DHS (Downflow Hanging Sponge). Japón.:Autor.



Integrantes:
Gildardo Arroyave Flores Wanda
Chester Anthony Yoniso
Diego Zamora de la Cruz Pablos



Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales de Sucre

López, N.^a, Sejas, G.^b

^a Lic. Ingeniero Civil de la facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. Correo electrónico: nikyloppad29@gmail.com

^b Lic. Ingeniero Civil, Maestrante/Egresado de la Maestría en Recursos Hídricos, Hidráulica e Ingeniería Sanitaria; Consultor en Supervisión de Proyectos en Saneamiento y Recursos Hídricos; Gestor de Programas y Proyectos Productivos y Sociales. Correo electrónico: gabbybbag@hotmail.com

RESUMEN

La contaminación a causa de aguas residuales es un problema latente. A casi veinte años del funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre, se hace necesario el mejoramiento para obtener un efluente menos contaminado. En el presente estudio se evalúa el estado del funcionamiento de la planta, plasmando e interpretando diferentes resultados de análisis laboratoriales de parámetros del agua residual con el objetivo de llegar a identificar las etapas que muestran una depuración menor a la esperada. Se concluye con la propuesta de la implementación de deflectores en las lagunas de sedimentación y maduración.

Palabras clave: planta de tratamiento de aguas residuales, análisis de parámetros del agua residual, deflectores en lagunas de maduración.

ABSTRACT

Pollution due to wastewater is a latent problem. It's almost twenty years since Sucre's Wastewater Treatment Plant has started its operation, so improvement is necessary to obtain a less polluted effluent. In this study, the state of the plant's operation is evaluated, displaying and interpreting different results of laboratory analyzes of wastewater parameters in order to identify the phases that show less purification than expected. It concludes with the proposal of the implementation of baffles in the sedimentation and maturation lagoons.

Keywords: wastewater treatment plant, wastewater parameters analysis, baffles in maturation lagoons

INTRODUCCIÓN

Se puede definir al agua residual como toda aquella agua que se desecha a través de las redes de alcantarillado sanitario que contiene aguas negras y aguas servidas. También incluye desechos de aguas industriales, mineras, etc.

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre (El Campanario) fue construida con el Proyecto Sucre II, y entró en funcionamiento el año 2003. Es una planta de tipo convencional y fue diseñada con un tiempo de vida útil de 30 años.

El cauce del Río Quirpinchaca fue, hasta antes de la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre, receptor directo de las aguas residuales de la población de Sucre, con un alto nivel de contaminación, situación que con la construcción de la planta fue mejorando, sin embargo, a veinte años de su construcción la población aguas abajo manifiesta afectación por contaminación.

La comunidad de El Campanario, que es la primera comunidad que se encuentra aguas abajo de la planta, y también otras comunidades, se ven afectadas por la constante agresión ambiental provocada principalmente por la contaminación del río Quirpinchaca.

Ante ello, se ve la necesidad de encontrar la manera de mejorar la calidad del efluente de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de Sucre proponiendo un proyecto de optimización de la planta, que, podría dar una solución pronta y temporal, garantizando un mejor funcionamiento para los años que quedan de su vida útil de diseño.

Con la realización de un estudio a profundidad de la planta se podrá identificar las unidades de tratamiento que desarrollan la depuración por debajo del rendimiento esperado, resultando un indicador que demande mejoras o modificaciones.

PTAR DE SUCRE – “EL CAMPANARIO”

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre se encuentra en la zona de la comunidad de El Campanario, a 8 km de la ciudad de Sucre, carretera entre Sucre y Potosí. La altitud promedio a la que se encuentra es 2630 m.s.n.m. y el área total utilizada es aproximadamente 11 ha.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales es un sistema combinado de tratamiento convencional. Este sistema consta de las siguientes estructuras hidráulicas y sanitarias fundamentalmente:

- Pretratamiento: para retención de sólidos de gran tamaño se cuenta con la entrada y Bypass, rejas de desbaste (dos mecánicas y una manual), aforador Parshall y dos desarenadores que funcionan de forma alterna.
- Tratamiento Primario: para sedimentación y estabilización de lodos residuales, seis tanques Imhoff, seis tanques de regulación y cámaras de derivación de caudales con cuatro reguladores de caudal tipo ALPHEUS.
- Tratamiento Secundario: cuatro lechos percoladores, dos lagunas de sedimentación secundaria y dos lagunas de maduración para el tratamiento biológico y remoción de compuestos biodegradables.
- Tratamiento de Lodos: para el tratamiento de lodos la planta cuenta con aéreas de secado de lodos.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre no utiliza insumos químicos en el tratamiento de las aguas residuales.



Figura 1 PTAR de Sucre

MATERIALES Y MÉTODOS

EVALUACIÓN DEL ESTADO Y FUNCIONAMIENTO DE LA PTAR DE SUCRE

Se consideró que la forma más adecuada de realizar el diagnóstico, sería mediante una amplia recopilación y obtención de resultados de los análisis de las características del agua residual en cada etapa del tratamiento.

Además de contar con un registro de las últimas cuatro gestiones de la planta, se optó por complementar de manera experimental con asistencia diaria a la misma durante seis meses aproximadamente; este periodo benefició en la familiarización y el aprendizaje del funcionamiento completo de la planta y en general de PTARs,

del mismo modo todo el trabajo de laboratorio, llegando a realizar de forma específica y personal cada ensayo del agua residual.

Parámetros del agua evaluados en la PTAR

El laboratorio de la PTAR de Sucre, se encarga de evaluar las diferentes características físicas, químicas y biológicas del agua residual, comparando y tomando en cuenta los valores máximos establecidos en el RMCH (Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica).

En la siguiente tabla se especifica los parámetros que se analizan en la PTAR de Sucre y teniendo en cuenta que plasmar resultados de todos los ensayos que se realizan sería algo muy extenso, se optó por identificar e interpretar las características más importantes del agua residual (resaltados en la tabla).

Tabla 1 Parámetros de AR evaluados

PARÁMETRO	UNIDAD	Máx. acept.	Método de análisis
Caudal	l/seg	405,00	Medidor Parshall
DBO ₅	mgO ₂ /L	80,00	BODTrakTM II
DQO	mgO ₂ /L	250,00	Volumétrico
pH		6,0-9,0	pHmetro
Temperatura	°C		pHmetro
SST	mg/L	60,00	Gravimétrico
Coliformes Termoresistentes	NMP/100 ml	1.000	Tubos múltiples
Sólidos Sedimentables	mg/L	100,00	Gravimétrico
Sólidos Totales	mg/L	1.500	Gravimétrico
Sólidos Volátiles	%		Gravimétrico
Conductividad eléctrica	µS/cm		Conductímetro
Oxígeno Disuelto	mgO ₂ /L	>50%	Medidor de OD
N-NH ₄	mgN/L		Colorímetro
Turbidez		<2.000	Colorímetro
Metales pesados			Colorímetro
Ensayos de metales pesados: fenoles, cianuro, fósforo, hierro, sulfuro, níquel, cromo, cobre, cadmio y plomo.			

Puntos de muestreo y análisis del agua residual de la PTAR

El muestreo de agua residual es el procedimiento por el cual se extrae una porción de agua representativa para la realización de los diferentes análisis de sus características.

El muestreo en la PTAR de Sucre se lo realiza de forma manual con recipientes de metal para el llenado de los bidones, tomando en cuenta las medidas de seguridad

que esto requiere. Las muestras son almacenadas en bidones de plástico de 5 litros de capacidad debidamente identificadas con un código del punto de muestreo en una etiqueta. Finalmente, cada muestra se conserva a menos de 10 °C.

En la figura 2 se puede apreciar un esquema donde se identifican los puntos o lugares de muestreo, en la tabla 2 se detalla y explica la ubicación de los puntos de muestreo.

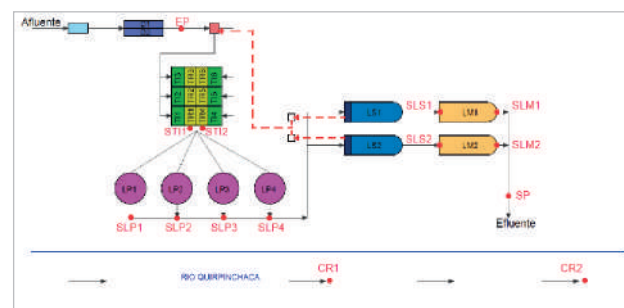


Figura 2 Esquema Puntos de Muestreo PTAR de Sucre

Tabla 2 Detalle Puntos de Muestreo PTAR de Sucre

Puntos de muestreo		
CÓDIGO	NOMBRE	UBICACIÓN
EP	Entrada de Planta	Después de desarenadores
STI1	Salida Tanques Imhoff 1	Cámara ALPHEUS 1
STI2	Salida Tanques Imhoff 2	Cámara ALPHEUS 2
SLP1	Salida Lecho Percolador 1	Canal de salida del LP1
SLP2	Salida Lecho Percolador 2	Canal de salida del LP2
SLP3	Salida Lecho Percolador 3	Canal de salida del LP3
SLP4	Salida Lecho Percolador 4	Canal de salida del LP4
SLS1	Salida Laguna de Sedimentación 1	Chorro de entrada a LM1
SLS2	Salida Laguna de Sedimentación 2	Chorro de entrada a LM2
SLM1	Salida Laguna de Maduración 1	Vertedor LM1
SLM2	Salida Laguna de Maduración 2	Vertedor LM2
SP	Salida de Planta	Canal de salida del AR tratada
CR1	Cuenca Receptora 1	50 m aguas arriba de SP (Río)
CR2	Cuenca Receptora 2	500 m aguas abajo de SP (Río)

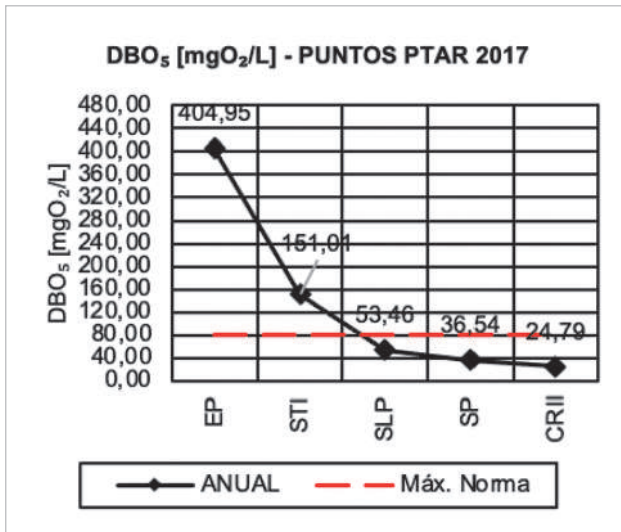
Datos del periodo 2017 – 2020 de la PTAR de Sucre

Se obtuvo datos semanales de los ensayos de la PTAR, desde la gestión 2017 hasta la gestión 2020, consideran-

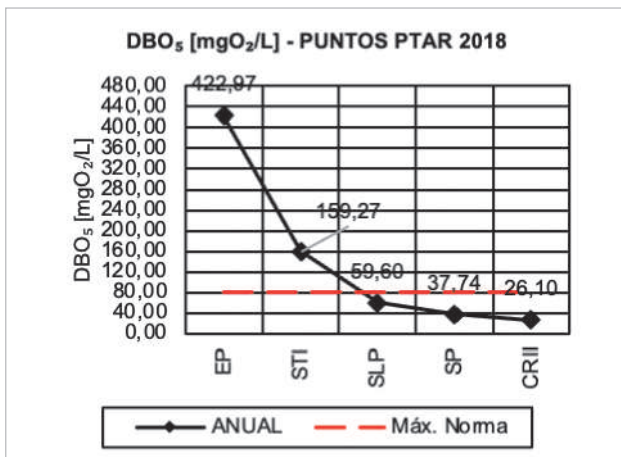
do que los cuatro últimos años de funcionamiento de la planta, son un periodo razonable para comparar y sintetizar datos.

Se debe aclarar que, durante el periodo de septiembre a noviembre de la gestión 2020, la planta estaba trabajando sin los lechos percoladores debido a falta de mantenimiento.

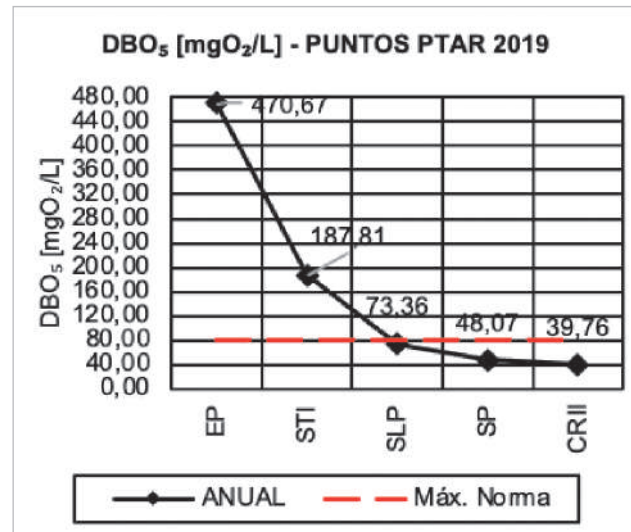
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno al quinto día (DBO₅):** Las gráficas exponen el valor de DBO₅ (promedio anual) en diferentes puntos de la planta; se puede observar, que en general, los valores de entrada están por encima de 400 mgO₂/L, también que la mayor disminución se da en el tratamiento de los tanques Imhoff y de los lechos percoladores. A su vez, se podría concluir que, la planta cumple con la norma en cuanto al efluente, y que con el transcurso del cauce receptor aguas abajo, este valor va disminuyendo gradualmente.



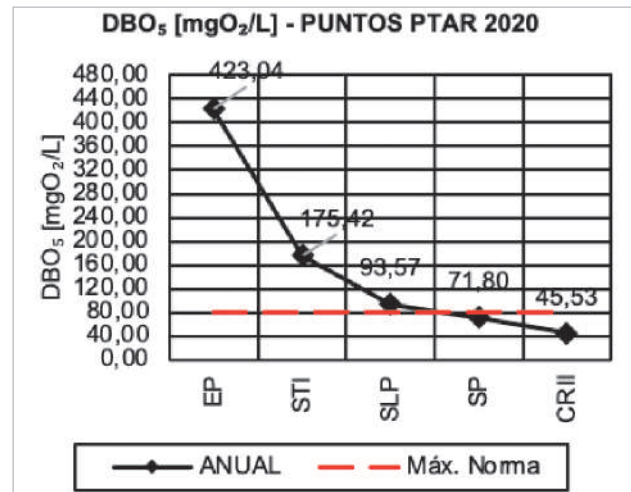
Gráfica 1 DBO₅ vs etapas de tto. (2017)



Gráfica 2 DBO₅ vs etapas de tto. (2018)

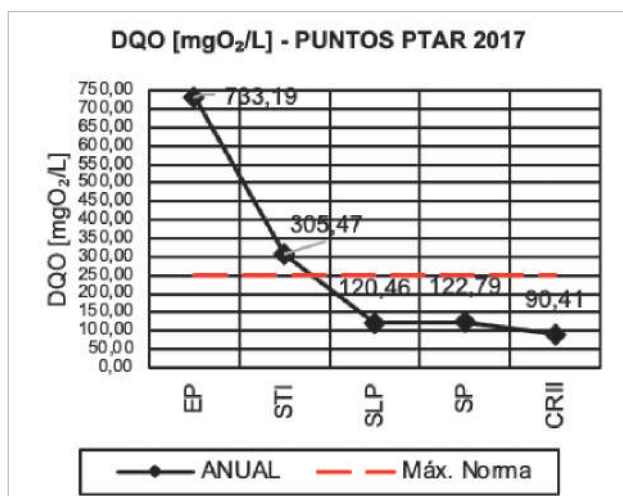


Gráfica 3 DBO₅ vs etapas de tto. (2019)

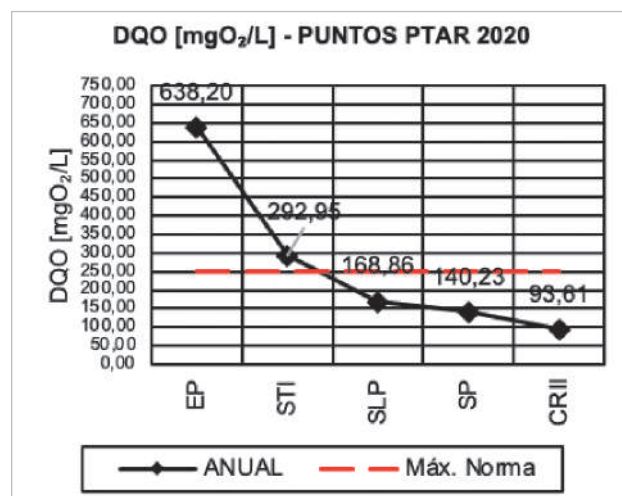


Gráfica 4 DBO₅ vs etapas de tto. (2020)

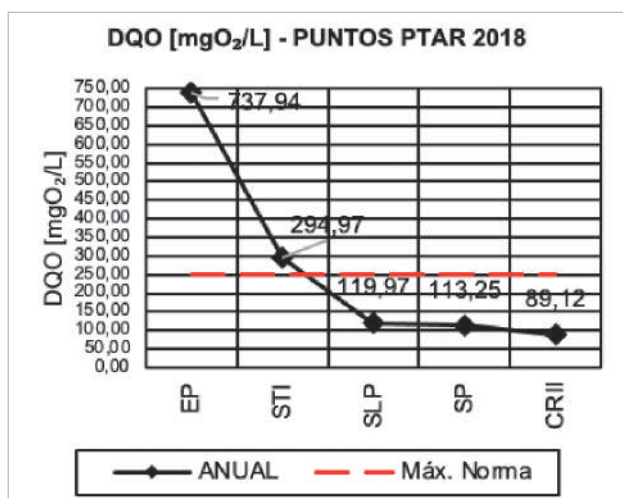
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Las gráficas muestran los valores promedios anuales de DQO a la salida de cada etapa de tratamiento, pudiendo identificarse la forma en la que éstos van descendiendo a través del tratamiento que reciben. Comparando los valores en las diferentes etapas de tratamiento, las variaciones son mínimas entre cada año. Los valores de entrada a la planta están entre 630 y 750 mgO₂/L, y los valores del efluente de la planta son menores a 150 mgO₂/L (máximo valor por norma 250 mgO₂/L).



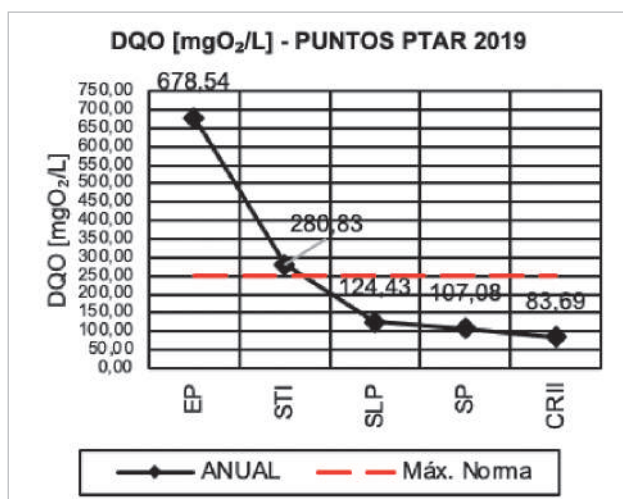
Gráfica 5 DQO vs etapas de tto. (2017)



Gráfica 8 DQO vs etapas de tto. (2020)



Gráfica 6 DQO vs etapas de tto. (2018)

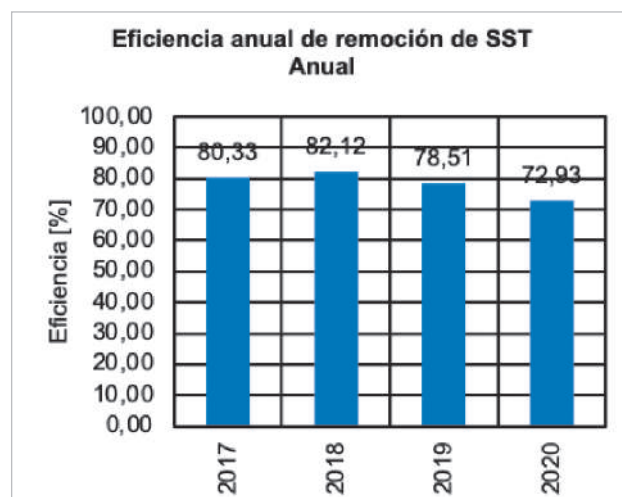


Gráfica 7 DQO vs etapas de tto. (2019)

- **Sólidos suspendidos totales (SST):** A causa de la falta de análisis de SST en los diferentes puntos de tratamiento de la planta, sólo se puede realizar una interpretación anual y general; se observa, en la gráfica, que la eficiencia de remoción de SST está por encima del 70%, sin embargo, no es suficiente para que los valores del efluente cumplan con la norma.

Tabla 3 SST gestiones 2017 - 2020

AÑO	SST [mg/L]			
	EP	SP	CRI	CRII
2017	399,68	77,08	75,00	68,75
2018	424,90	75,08	67,51	73,76
2019	406,26	86,57	85,75	98,58
2020	363,30	98,57	88,48	75,15
Máx		60,00	60,00	60,00

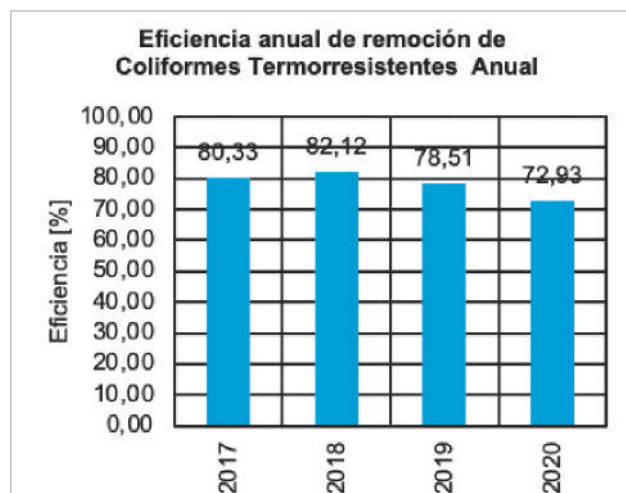


Gráfica 9 Eficiencias de remoción SST

- **Coliformes Termorresistentes:** Los valores de los coliformes termorresistentes son demasiado elevados, y están lejos de cumplir con lo establecido en la norma, como se puede apreciar en la tabla. Por otro lado, cabe resaltar la alta eficiencia de remoción de coliformes termorresistentes de la planta en conjunto.

Tabla 4 Coliformes termorresistentes anual

Coliformes Termorresistentes			
AÑO	EP [NMP/100ml]	SP [NMP/100ml]	Eficiencia [%]
2017	9,60E+07	4,81E+06	85,29
2018	5,26E+07	8,11E+06	80,24
2019	4,75E+08	1,81E+07	91,76
2020	5,38E+07	4,56E+06	86,36
Máx		1,00E+03	

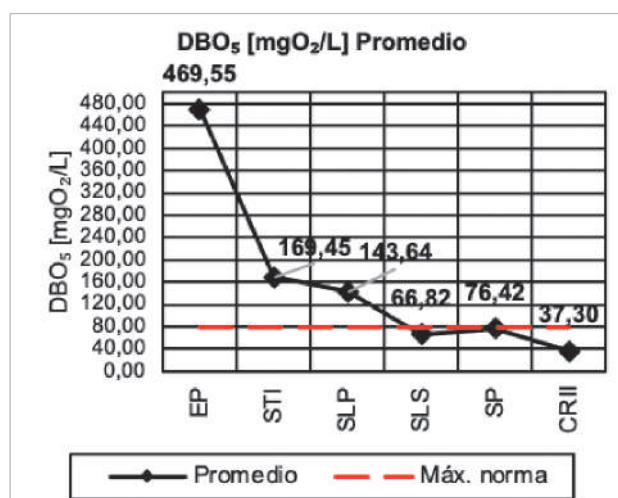


Gráfica 10 Eficiencias de remoción

Datos del periodo de recolección de información in situ

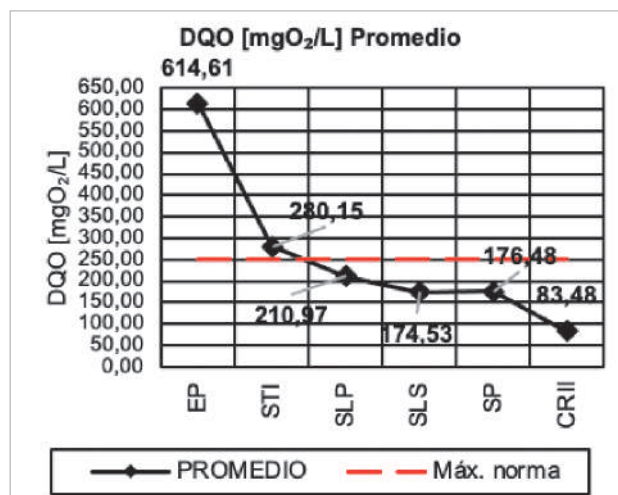
Como se pudo observar en los gráficos de las gestiones pasadas de la planta, no se lleva un registro a la salida de cada etapa de tratamiento, la complementación de análisis en esos puntos faltantes se los llegó a realizar durante los meses en los que se hizo visitas a la planta.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno al quinto día (DBO₅):** En la gráfica se puede resaltar la baja remoción de los lechos percoladores, teniendo en cuenta que no estuvieron en funcionamiento durante casi cuatro meses, es importante comparar con los valores previos, remarcando que cuando los lechos percoladores funcionan, la remoción tiende a ser muy alta.



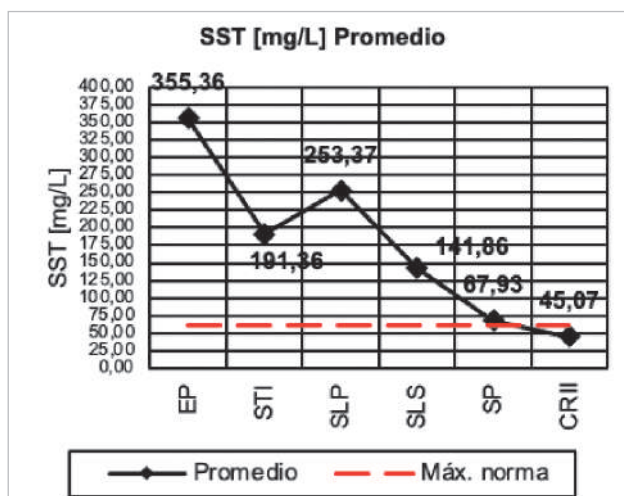
Gráfica 11 DBO₅ vs etapas de tratamiento

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** En la gráfica se puede resaltar que el valor a la salida de las lagunas de sedimentación es menor en relación al obtenido en la salida de la planta, esto supondría una degradación en la calidad del agua al pasar por las lagunas de maduración.



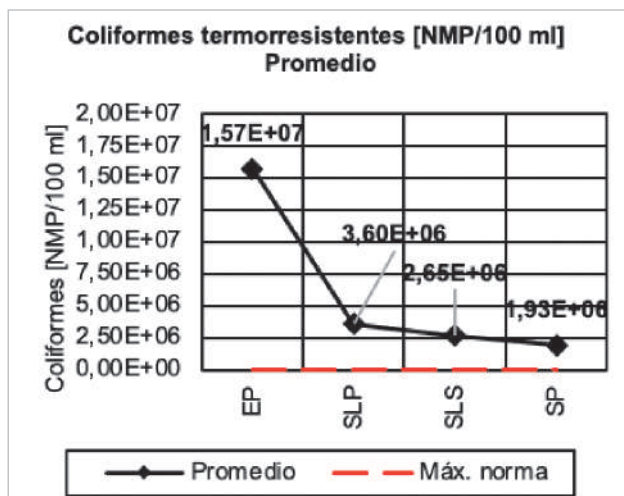
Gráfica 12 DQO vs etapas de tratamiento

- **Sólidos suspendidos totales (SST):** En la gráfica es importante resaltar que a la salida de los lechos percoladores tiende a aumentar el valor, esto se debe al desprendimiento de la biopelícula, remarcando la importancia de la zona de sedimentación en las lagunas de sedimentación. En el análisis de las cuatro gestiones anteriores se pudo observar que los SST son un parámetro difícil de cumplir; con los resultados in situ, se aprecia que si se encuentran cerca del valor máximo de la norma.



Gráfica 13 SST vs etapas de tratamiento

- **Coliformes Termorresistentes:** en la gráfica se puede observar que hasta la salida de los lechos, generalmente, existe una remoción de coliformes; en cambio en las lagunas de sedimentación, la remoción es poca o nula, y en las lagunas de maduración si se da remoción, pero no de forma tan eficiente como debería de ser.



Gráfica 14 Coliformes vs etapas de tratamiento

Conclusiones de la evaluación del estado de la PTAR de Sucre

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre trabaja bajo altas eficiencia de rendimiento general, sobre todo es de resaltar el rendimiento de la etapa de tratamiento primario.

Los valores de DBO₅ y DQO a la salida de la planta si son más bajos que los máximos del RMCH; por lo que en realidad pueden considerarse valores que no se necesitan optimizar de forma inmediata.

Los sólidos suspendidos totales son un parámetro con resultados elevados en la PTAR, la eficiencia de remoción en el tratamiento primario es aproximadamente del 45%, en las lagunas de sedimentación, la remoción es similar a la del tratamiento primario, con aproximadamente 44%. Estos sólidos sólo tienden a tener una mejor remoción con un asentamiento químico (floculadores), pero la PTAR de Sucre, al intentar ser amigable con el ambiente y evitar costos elevados de tratamiento, no cuenta, ni podrá contar con una etapa de tratamiento químico para los sólidos suspendidos.

Los coliformes termorresistentes o coliformes fecales son el parámetro de tratamiento más débil de la planta, a pesar de tener eficiencias de remoción altas, los valores están lejos de llegar a cumplir con la norma.

RESULTADOS

Habiendo realizado una interpretación amplia de los resultados de la PTAR de Sucre, y con las conclusiones deducidas, se definió que una manera razonable de optimizar la planta sería buscando la forma de mejorar las lagunas de sedimentación y maduración (tratamiento de coliformes termorresistentes), dejando de lado la opción de ampliarlas.

DEFLECTORES EN LAGUNAS DE SEDIMENTACIÓN Y MADURACIÓN

Los deflectores, pantallas o mamparas en las lagunas de las PTARs, son estructuras de partición que al subdividir las lagunas logran incrementar el tiempo de retención del agua y crear un flujo con mayor eficiencia, dado que una laguna sin deflectores tiene un flujo de agua tipo disperso, y con implementación de las mismas cambia a un flujo tipo pistón.

El método empleado para el diseño de lagunas de sedimentación y de maduración con deflectores es el de "Flujo Disperso" (Método de Yánez). Este método consiste en el cálculo de la remoción de coliformes termorresistentes y DBO₅ en el efluente de la laguna. Como las dimensiones y el tiempo de retención de las lagunas de la PTAR de Sucre no pueden cambiarse, el enfoque será calcular la remoción de coliformes termorresistentes y DBO₅ con la implementación de deflectores.

Tabla 5 Ecuaciones empleadas Método de Yánez

Parámetro de cálculo		Unidad	Ecuación	
a	Tiempo de retención hidráulico	O	días	$O_s = \frac{V}{Q_i}$
b	Evaporación (Método Hargreaves – Samani)	ev	mm/día	$ev = 0,0023R_A(t + 17,8)(t_{máx} - t_{mín})^{0,5}$
c	Caudal efluente corregido por evaporación	Q _e	m ³ /día	$Q_e = Q_i - 0,001A_{sup}ev$
Remoción de coliformes termorresistentes en el efluente				
d	Relación largo ancho de la lagunas	x	-	$x = \frac{B_{prom} * 0,7 * (N_{mamp} + 1)}{L_{prom}/(N_{mamp} + 1)}$
e	Coefficiente de dispersión	d	-	$d = \frac{x}{-0,26118 + 0,25392x + 1,0136x^2}$
f	Coefficiente de reducción bacteriana (Yánez 1984)	K _b	d ⁻¹	$K_b = 0,841 * (1,075)^{T-20}$
g	Constante "a" (Thirumurthi)	a	-	$a = \sqrt{1 + 4K_b O_s d}$
h1	Coefficiente de coliformes (Thirumurti 1969)	N _f /N _o	-	$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4ae^{\frac{1-a}{2d}}}{(1+a)^2}$
h2	Coliformes termorresistentes efluente (Thirumurti 1969)	N _e	NMP/100ml	$N_e = \frac{N_f}{N_o} * N_i$
i	Coliformes termorresistentes corregidos por evaporación	N _{ecorr}	NMP/100ml	$N_{ecorr} = \frac{Q_i}{Q_e} * N_e$
Concentración de DBO₅ en el efluente				
j	Constante de decaimiento de primer orden para DBO ₅ (Marais 1974)	k	d ⁻¹	$\frac{S_a}{S_e} = 1 + kt$
k	DBO ₅ en el efluente	DBO _e	mgO ₂ /L	$DBO_e = \frac{DBO_i}{k O_s + 1}$
l	DBO ₅ en el efluente corregido por evaporación	DBO _{ecorr}	mgO ₂ /L	$DBO_{ecorr} = \frac{Q_i}{Q_e} * DBO_e$
m	Cálculo de eficiencias de remoción	% _{rem}	%	$\% = \frac{Valor\ afluyente - Valor\ efluente}{Valor\ afluyente} * 100$

Resultados con el caudal de diseño

El caudal de diseño de la PTAR de Sucre es de **20.724,00 m³/día**.

Tabla 6 Resultados con el caudal de diseño

Parámetro de cálculo		Unidad	LS1	LS2
Número de deflectores	N _{mamp}		14	14
Coliformes termorresistentes corregido	N _{ecorr}	NMP/100ml	1,97E+06	1,99E+06
DBO ₅ en el efluente corregido	DBO _{ecorr}	mgO ₂ /L	64,66	65,33
Parámetro de cálculo		Unidad	LM1	LM2
Número de deflectores	N _{mamp}		10	10
Coliformes termorresistentes corregido	N _{ecorr}	NMP/100ml	1,36E+06	1,35E+06
DBO ₅ en el efluente corregido	DBO _{ecorr}	mgO ₂ /L	56,85	57,10

Resultados de simulación con datos concurrentes en la PTAR de Sucre

En la actualidad, la planta de tratamiento no funciona con su caudal de diseño, por lo que se optó por realizar la simulación de resultados con un caudal promedio con los datos registrados en las últimas cuatro gestiones, obteniendo un resultado de **12.744,17 m³/día**.

Tabla 7 Resultados de simulación con datos concurrentes en la PTAR de Sucre

Parámetro de cálculo		Unidad	LS1	LS2
Número de deflectores	N_{mamp}		14	14
Coliformes termorresistentes corregido	N_{ecorr}	NMP/100ml	1,35E+06	1,38E+06
DBO ₅ en el efluente corregido	DBO_{ecorr}	mgO ₂ /L	48,20	48,81
Parámetro de cálculo		Unidad	LM1	LM2
Número de deflectores	N_{mamp}		10	10
Coliformes termorresistentes corregido	N_{ecorr}	NMP/100ml	7,46E+05	7,38E+05
DBO ₅ en el efluente corregido	DBO_{ecorr}	mgO ₂ /L	39,40	39,54

Eficiencias de remoción

Para comparar las eficiencias de remoción de DBO₅ y coliformes termorresistentes, se aprovechó los datos anuales de la gestión 2020.

Tabla 8 Eficiencia de remoción

			Entrada de planta	Salida de planta	Eficiencia [%]
Datos de diseño general	DBO ₅	Sin deflectores	423,04	71,80	83,03
		Con deflectores	423,04	56,98	86,53
	Coliformes termorresistentes	Sin deflectores	5,38E+07	4,56E+06	91,53
		Con deflectores	5,38E+07	1,36E+06	97,48
Datos concurrentes	DBO ₅	Sin deflectores	423,04	71,80	83,03
		Con deflectores	423,04	39,47	90,67
	Coliformes termorresistentes	Sin deflectores	5,38E+07	4,56E+06	91,53
		Con deflectores	5,38E+07	7,42E+05	98,62

Implementación, operación y mantenimiento de deflectores

El material considerado para una propuesta económica son paneles pretensados de hormigón (H-35), con sus respectivos postes de hormigón armado (H-21). Estos son materiales prefabricados y de colocación fácil y rápida.

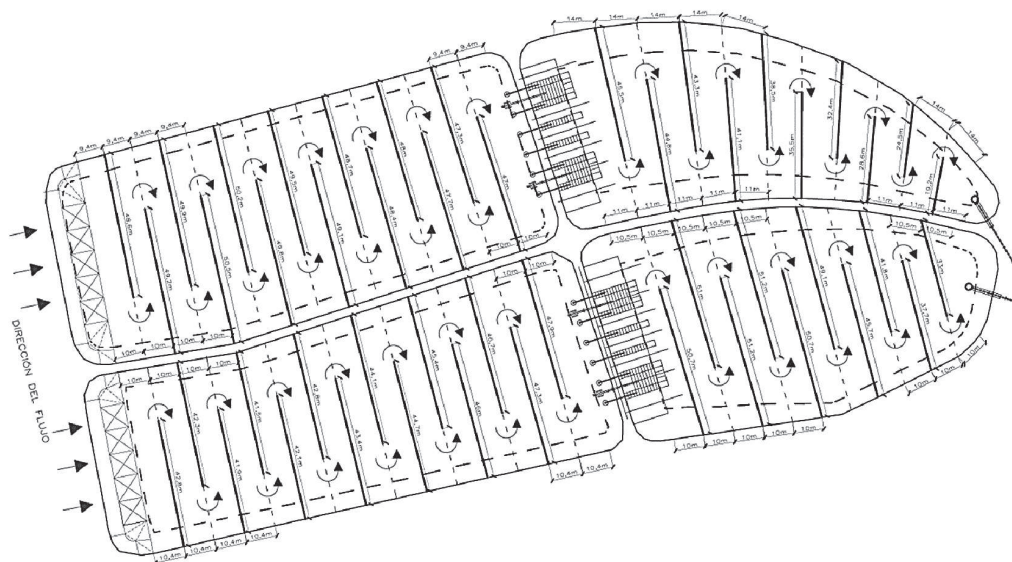


Figura 3 Esquema ubicación de deflectores

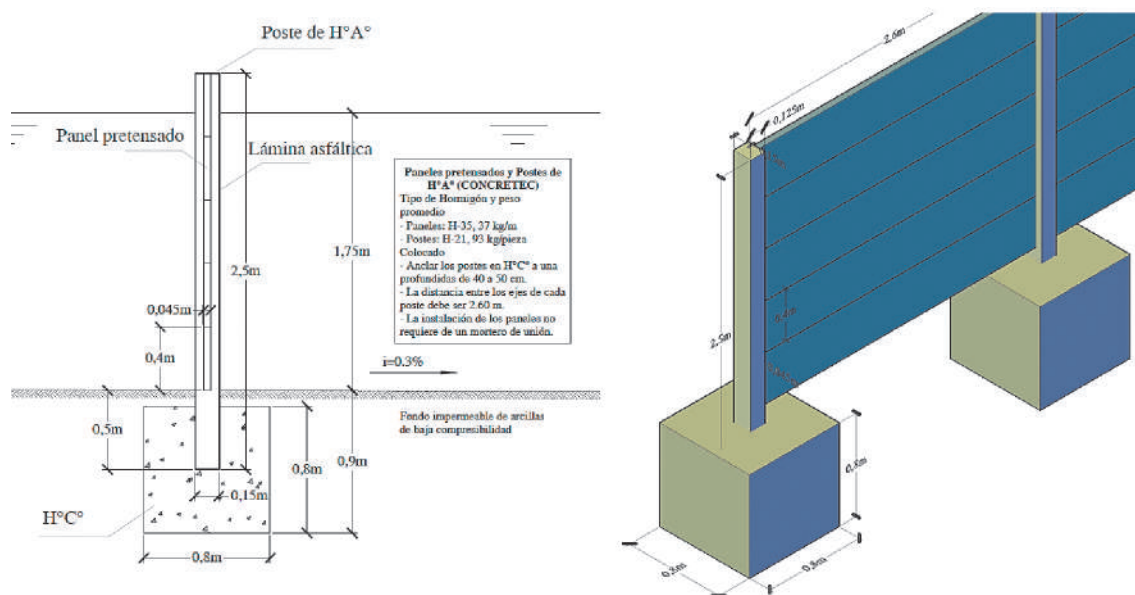


Figura 4 Detalle deflectores

CONCLUSIONES

La PTAR de Sucre, respecto al caudal de ingreso, actualmente trabaja con el 61,5% (promedio) de su capacidad total.

Mediante la evaluación histórica de los parámetros físicos, químicos y biológicos del efluente de la PTAR de Sucre, se puede afirmar que las características de sólidos suspendidos totales y coliformes termoresistentes, no cumplen con el valor máximo establecido en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH).

Es de gran importancia la correcta operación y mantenimiento de los diferentes sistemas de tratamiento. Se hace énfasis en el funcionamiento constante de los lechos percoladores, debido a que se pudo comparar los resultados de cuando éstos no actúan en el tratamiento. Al respecto, también se puede señalar que, a partir de que un lecho percolador comienza a funcionar, después de un tiempo sin estar trabajando, se da un periodo de al menos tres meses en retomar el proceso de tratamiento, debido a la nueva formación de biopelícula.

El tiempo de retención hidráulica en las lagunas de maduración, es demasiado bajo, siendo lo recomendable un mínimo de 5 días para garantizar resultados próximos al límite por norma.

Con el diseño de deflectores en las lagunas de sedimentación y de maduración, se comprobó que, su implementación contribuiría a una disminución considerable de coliformes termoresistentes en el efluente de la PTAR, incrementando las eficiencias de remoción por encima del 98% en relación al promedio de 90% (historial).

Se considera que los deflectores son una alternativa económica y apropiada para mejorar el estado actual de la PTAR, al no requerir de un proceso largo y complicado de implementación y no realizar un cambio esencial en la forma de la planta (como sería ampliaciones), además de no necesitar una operación especial y ser de poco mantenimiento.

Una solución, que si en un futuro puede volverse factible, es sin duda la ampliación de las lagunas de maduración. Por otro lado, se puede considerar complementar con tratamiento químico de desinfección, por ejemplo, estaciones de cloración a la salida de las lagunas de maduración, como se presentaba en versiones anteriores al proyecto final de la planta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cuba, F., ANESAPA. (2004). Tratamiento de Aguas Residuales. Capacitación para la EPSA Boliviana N°17. La Paz.
- Alvarez, E. & Contreras, D., ANESAPA. (2004). Control de Calidad de Aguas Residuales. Capacitación para la EPSA Boliviana N°18. La Paz.
- Cuba, F., ANESAPA. (2004). Lodos y Aguas Servidas Tratadas. Capacitación para la EPSA Boliviana N°19. La Paz.
- E.L.A.P.A.S. (2003). Manual de Operación y Mantenimiento y Descripción de las Obras. Sucre.
- Catalán, J. (1997). Depuradoras Bases Científicas. Madrid: Editorial Bellisco.
- Romero, J. (1999). Tratamiento de Aguas Residuales por

Lagunas de Estabilización. (3ra ed.). Bogotá: Alfaomega Grupo Editor.

Romero, J. (2000). Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño. (3ra ed.). Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Metcalf y Eddy. García, A. (Ed.). (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. (3ra ed. Vol. I). Nueva York: McGraw-Hill.

Metcalf y Eddy. García, A. (Ed.). (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. (3ra ed. Vol. II). Nueva York: McGraw-Hill.

Wagner, W. (2010). Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia. La Paz: ANESAPA y PROAPAC.

Wagner, W. (2005). Borrador Peritaje sobre posibilidades de la mejora de la planta de tratamiento de Sucre. ANESAPA.

Cortés, F., Treviño, A. & Tomasini, A. (2017). Dimensionamiento de lagunas de estabilización. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Sejas, G. (2003). Desarrollo del Proceso de Control Operacional y Mantenimiento de la Planta Depuradora de Aguas Residuales de Sucre. Proyecto de Grado, UMRPS-FXCH. Sucre, Bolivia.

Gobierno Autónomo Municipal de Yotala. (2017). Plan Territorial de Desarrollo Integral 2016 – 2020. Yotala.

Ley 1333 de 1992. Del Medio Ambiente. 27 de abril de 1992 (Bolivia).

Empresa Local de Agua Potable y Alcantarillado Sucre (ELAPAS). (2012). PLANTA DE AGUAS RESIDUALES. Nuestros Servicios - E.L.A.P.A.S. <http://www.elapas.com.bo/area-operativa/planta-de-aguas-residuales/>



La demostración rigurosa de la fórmula $\pi(x)$ y la criba de Beimar Wilfredo López Subia

López Subia Beimar Wilfredo ^a

^a Investigador en el área de matemática pura y avanzada, de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Sucre, Bolivia. E-mail: beimarlopezsubia@hotmail.com, WhatsApp: +591 60303881

RESUMEN

En este artículo se encuentra la demostración rigurosa de la fórmula contadora de números primos menores a un número dado; y gracias a ser correcta se ha encontrado la criba de Beimar Wilfredo López Subia, que puede ser explicada en el colegio. La fórmula demostrada en este artículo, se utilizará para encontrar la cantidad y cuáles son los números primos menores a un número dado. Sin embargo, se muestra varias aplicaciones de esta fórmula, como la de factorizar un número compuesto, identificar si el número es primo, encontrar la cantidad de primos en un rango dado, analizar primos gemelos y estudiar nueva matemática. En este artículo se dará a conocer algoritmos, fórmulas nuevas, estrategias y avances totalmente inéditos; para estudiar el número primo con detalle e inclusive crear una sucesión o saber exactamente cuál es el espacio entre números primos cualquiera. En la matemática todo es posible, y la creación de la criba de Beimar Wilfredo López Subia, está avalada mediante ejemplos numéricos, para que puede explicarse en el colegio de manera manual y así el estudiante puede aprender a encontrar la cantidad de números primos menores al número dado, sin conocer el número primo; y si es obligatorio conocer el número primo, puede hacerlo de manera rápida usando una fórmula sencilla, que no requiere uso de calculadora.

Palabras clave: La fórmula $\pi(x)$, La criba de Beimar Wilfredo López Subia, La función $C(x)$, La función $W(x,y)$.

ABSTRACT

In this article you will find the rigorous proof of the formula for counting prime numbers less than a given number; and thanks to being correct, the sieve of Beimar Wilfredo López Subia has been found, which can be explained at school. The formula demonstrated in this article will be used to find the quantity, and the results are prime numbers less than a given number. However, several applications of this formula are shown, such as factoring a composite number, identifying whether the number is a prime, finding the number of primes in a given range, analyzing twin primes, and studying new mathematics. This article will reveal brand new algorithms, new formulas, strategies, and advancements; to study the prime number in detail and even create a sequence or find out exactly what the space is between the prime numbers. In mathematics everything is possible, and the creation of the Beimar Wilfredo López Subia sieve is available through numerical examples, so that it can be explained manually at school and thus the student can learn to find the number of prime numbers less than the given number, without knowing the prime number; And if it is mandatory to know the prime number, you can do it quickly using a simple formula, which does not require the use of a calculator.

Key words: The formula $\pi(x)$, The sieve of Beimar Wilfredo López Subia, The function $C(x)$, The function $W(x,y)$.

INTRODUCCIÓN

Para todo matemático la importancia del número primo es indiscutible; dado que el resto de los números naturales se han creado o han existido gracias al producto de números primos, y por eso se considera un bloque principal para construir la matemática.

La matemática es como un edificio, que se puede saber cómo reaccionará a una tormenta o un terremoto, si se conoce de que está hecho; la matemática esta hecho de números primos, si no se conocería los números primos, la matemática no hubiera existido; por ese motivo el número primo es el corazón de problemas matemáticos tan célebres como la hipótesis de Riemann. Sin embargo y pese a la pureza teórica defendida por los matemáticos, lo cierto es que los números primos también han aportado grandes utilidades prácticas a la humanidad, como el comercio electrónico.

En 1977, tres investigadores diseñaron la criptografía RSA (iniciales de Rivest, Shamir y Adleman), basada en el producto conocido de dos números primos grandes, y que solo puede descifrar quien conoce los factores. Este tipo de encriptación, llamada asimétrica o de clave pública, se utiliza para el cifrado en internet; por ejemplo, en la firma digital, y es la aplicación actual más importante de los grandes números primos.

Lo más impactante fue la fórmula que cuenta los números primos menores a un número dado, por Beimar Wilfredo López Subia, que ha dado la vuelta al mundo y aún sigue siendo todavía una fórmula inédita.

Ha existido repercusión el todo sentido, y por ese motivo lo han demostrado muchos matemáticos intentando derrumbar la fórmula, y una gran cantidad ha llegado a darse cuenta que esta fórmula no puede ser derrumbada, porque el entendimiento del número primo que estudia va más allá de una fórmula. Por esa razón aquí se demostrará, se reducirá y se encontrará una aplicación de la fórmula; que gracias a esta aplicación ganará fuerza en el sentido de la utilidad práctica.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Fórmula contadora de números primos de Beimar Wilfredo López Subia, sirve para encontrar la cantidad y cuáles son los números primos menores a un número dado; verificando por separado cada número y sabiendo el motivo por el cual número es primo. Como su nombre indica, es una fórmula que sirve para hacer una mejora; un ajuste mediante la función $Eit(x)$, y viendo una nueva manera de ver cada número conocido.

Esta fórmula no se puede estudiar en el colegio, porque la idea es graficar la función para analizar la matemática que existe dentro de la misma; pero para el colegio esta la criba de Beimar Wilfredo López Subia, que se puede explicar en el colegio y sacar el mismo resultado que se encuentra mediante la fórmula.

Cantidad de números primos menores a un número dado:

Para encontrar la cantidad de números primos menores a un número dado x , se usa una formula denotada mediante $\pi(x)$ (no debe confundirse con el número π) y se define como:

$$\pi(x) = \#\{p \in \mathbb{P} \mid p < x\}$$

donde # significa la cantidad de números que cumplen la condición indicada.

En el teorema el número x debe un número entero, y mayor a 3. Donde \mathbb{P} es el conjunto de números primos y \mathbb{N} el conjunto de números naturales. Y el teorema dice que para x mayor a 3; la cantidad de números primos menores a un número se calcula mediante el teorema:

a). Sea $\pi(x) = \#\{p \in \mathbb{P} \mid p < x\}$; $\forall x \in \mathbb{N} \mid x > 3$; el valor de $\pi(x)$:

$$\pi(x) = \left\lfloor \frac{1}{2} \left[\frac{2x + (-1)^x - 6 * C(x) + 5}{3} \right] \right\rfloor = f(x) - C(x)$$

Donde:

- Si $4 \leq x < 26$ el valor de $C(x) = 0$.

· Si $x \geq 26$ se debe encontrar el valor de $C(x)$:

$$C(x) = \sum_{j=8}^{A(x)} \text{Eit} \left(\sum_{i=1}^{m(x)} \text{Eit}(\beta_{(i,j)}) \right)$$

Siendo los valores de $A(x)$ y $m(x)$:

$$A(x) = \left\lfloor \frac{1}{2} \left\lfloor \frac{2x + (-1)^x - 7}{3} \right\rfloor \right\rfloor$$

$$m(x) = \left\lfloor \frac{-1 + \sqrt{1 + 3 * A(x)}}{3} \right\rfloor$$

Y la función $\text{Eit}(x)$:

$$\text{Eit}(x) = \begin{cases} 0 & , \quad x \notin \mathbb{N} \\ 1 & , \quad x \in \mathbb{N} \end{cases}$$

$$\mathbb{N} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots\}$$

Para usar $\pi(x) = f(x) - C(x)$, el valor $f(x)$ es:

$$f(x) = \frac{2x + (-1)^x + 5}{6}$$

y se debe redondear correctamente. Las funciones de piso y suelo, son funciones de redondeo y se explicará con más detalle. La función $\beta_{(i,j)}$ para la fórmula creada, puede reemplazarse por $\alpha_{(i,j)}$. Se muestra la función $\beta_{(i,j)}$:

$$\beta_{(i,j)} = \frac{4j - (-1)^j + (2i + 1)(-1)^{i+j} + (2i - 1)(-1)^i - 12i^2 + 5}{12i + 6 - 2(-1)^i}$$

$$C(x) = \sum_{j=8}^{A(x)} \text{Eit} \left(\sum_{i=1}^{m(x)} \text{Eit}(\beta_{(i,j)}) \right) = \sum_{j=8}^{A(x)} \text{Eit} \left(\sum_{i=1}^{m(x)} \text{Eit}(\alpha_{(i,j)}) \right)$$

Reducción de la función Beta $\beta_{(i,j)}$:

La función $\beta_{(i,j)}$ es la más importante para la fórmula creada, pero se verá que puede reducirse de manera notable y sacar un mismo resultado; usando otras funciones $\alpha_{(i,j)}$ y $\gamma_{(i,j)}$. Se muestra la función $\beta_{(i,j)}$:

$$\beta_{(i,j)} = \frac{4j - (-1)^j + (2i + 1)(-1)^{i+j} + (2i - 1)(-1)^i - 12i^2 + 5}{12i + 6 - 2(-1)^i}$$

Siendo la más completa, pero en este caso se puede usar la función $\alpha_{(i,j)}$, con la que igual funciona la fórmula:

$$\alpha_{(i,j)} = \frac{6(j - i) - (-1)^j + (-1)^i}{6i + 3 - (-1)^i}$$

Y aún más, esta puede ser reemplazada por una función $\gamma_{(i,j)}$:

$$\gamma_{(i,j)} = \frac{6j + 3 - (-1)^j}{6i + 3 - (-1)^i}$$

siendo super reducida; y puede mejorarse cambiando límite de la sumatoria $C(x)$.

Ahora todavía sin cambiar límite, se usará $\beta_{(i,j)}$ y $\alpha_{(i,j)}$; haciendo correcta la igualdad:

$$C(x) = \sum_{j=8}^{A(x)} \text{Eit} \left(\sum_{i=1}^{m(x)} \text{Eit}(\beta_{(i,j)}) \right) = \sum_{j=8}^{A(x)} \text{Eit} \left(\sum_{i=1}^{m(x)} \text{Eit}(\alpha_{(i,j)}) \right)$$

Fórmula y algoritmo para saber si un número primo o compuesto:

Cabe destacar que se mostrará la fórmula para saber si el número es primo o es no primo; y el teorema dice que un número x es primo si $C(t)$ es igual a cero.

$$C(t) = \sum_{j=t}^t \text{Eit} \left(\sum_{i=1}^{A(t)} \text{Eit}(\beta_{(i,j)}) \right)$$

$$; \text{ para } A(t) = \left\lfloor \frac{-1 + \sqrt{1 + 3t}}{3} \right\rfloor$$

El valor de t , se calcula mediante el criterio:

$$t_i = \frac{r-1}{3} \text{ (Si es un número entero par, elegir este valor para } t)$$

$$t_j = \frac{r-2}{3} \text{ (Si es un número entero impar, elegir este valor para } t)$$

Si t_i y t_j no es número entero, el valor de x es directamente no primo. Si es entero, verifique si es par o impar como se le indica y podrá elegir el valor de t . Después de elegir t verifique si $C(t)$ es igual a cero, para asegurar que el número x es primo.

Una reducción más fácil es reduciendo la función $C(t)$, tomando en cuenta una sola sumatoria para $t = \text{par}$, y para $t = \text{impar}$ (Se reducirá $\beta_{(i,j)}$):

$$\beta_{(i,j)} = \frac{4j - (-1)^j + (2i+1)(-1)^{i+j} + (2i-1)(-1)^i - 12i^2 + 5}{12i+6-2(-1)^i}$$

Para un valor de $j = t$ e igual a número par, se obtiene:

$$\beta_{(i,t)} = \frac{2t-6i^2+2+2i(-1)^i}{6i+3-(-1)^i} \quad (t \text{ es número par}).$$

Para un valor de $j = t$ e igual a número impar, se obtiene:

$$\beta_{(i,t)} = \frac{2t-6i^2+3+i(-1)^i}{6i+3-(-1)^i} \quad (t \text{ es número impar}).$$

Eso significa es más rápido saber si un número es primo, porque la ecuación $C_{(t)}$:

$$C_{(t)} = \sum_{i=1}^{A_{(t)}} \text{Eit}(\beta_{(i,t)})$$

Por otro lado, se puede disminuir aún más sabiendo que el límite $A_{(t)}$ puede cortarse cuando el valor de $\beta_{(i,t)}$ es un número entero; aquí hay un algoritmo que ayudará a entender mejor el procedimiento.

El algoritmo cuenta los números primos, verificando primero el primalidad de cada número en un rango:

```
from math import ceil, floor, sqrt
def Cantidad(x):
    pi_ = ceil(0.5 * floor((2 * x + (-1) ** x - 6 * c_(x) + 5) / 3))
    return int(pi_)
def prime_(x):
    if (((x - 1) / 3) % 2) == 0 and ((x - 1) / 3).is_integer():
        z = ceil((sqrt(x)-1) / 3)
        for i in range(1, z + 1):
            r = (2*(x - 1) - 6*i + (-1) ** i - 1) / (6 * i + 3 - (-1) ** i)
            if r.is_integer():
                return False
        return True
    elif (((x - 2) / 3) % 2) != 0 and ((x - 2) / 3).is_integer():
        z = ceil((sqrt(x-1)-1) / 3)
        for i in range(1, z):
            r = (2*(x - 2) - 6*i + (-1) ** i + 1) / (6 * i + 3 - (-1) ** i)
            if r.is_integer():
                return False
        return True
    else:
        return False
```

```
def formula_1(x):
    if (x < 5):
        pass
    count = 2
    for i in range(5, x):
        if prime_(i):
            count += 1
    return count
values = [10, 100, 1000, 10000, 100000]
print("MÉTODO PRIMALIDAD DE BEIMAR WILFREDO LÓPEZ SUBIA")
for v in values:
    print(
        f"LA CANTIDAD DE PRIMOS MENORES A {v}, ES: {formula_1(v)}")
```

Cantidad de números primos en un rango dado:

Se puede encontrar los primos en un rango entre x_1 y x_2 , sabiendo que $x_1 < x_2$. De anterior teorema de números primos menores a un número dado se obtiene:

$$\pi_{(x_2)} = \left\lfloor \frac{1}{2} \left\lfloor \frac{2x_2 + (-1)^{x_2} + 5}{3} \right\rfloor \right\rfloor - C_{(x_2)} = f_{(x_2)} - C_{(x_2)}$$

$$\pi_{(x_1)} = \left\lfloor \frac{1}{2} \left\lfloor \frac{2x_1 + (-1)^{x_1} + 5}{3} \right\rfloor \right\rfloor - C_{(x_1)} = f_{(x_1)} - C_{(x_1)}$$

Luego, si $\Delta\pi_{(n)} = \pi_{(x_2)} - \pi_{(x_1)}$, se puede decir que:

$$\Delta\pi_{(n)} = \pi_{(x_2)} - \pi_{(x_1)} = f_{(x_2)} - f_{(x_1)} - (C_{(x_2)} - C_{(x_1)})$$

$$\Delta\pi_n = \Delta f_{(n)} - \Delta C_{(n)}$$

El valor n representa un rango, y el valor $\Delta C_{(n)}$ de ese rango es:

$$\Delta C_{(n)} = C_{(x_2)} - C_{(x_1)} = \sum_{j=A_{(x_1)+1}}^{A_{(x_2)}} \text{Eit} \left(\sum_{i=1}^{m_{(x_2)}} \text{Eit}(\beta_{(i,j)}) \right)$$

Eso significa, que ahora podemos saber un siguiente número en función de un número anterior y eso facilita el proceso de cálculo:

$$\pi_{(x_2)} - \pi_{(x_1)} = \left\lfloor \frac{1}{2} \left\lfloor \frac{2x_2 + (-1)^{x_2} + 5}{3} \right\rfloor \right\rfloor - \left\lfloor \frac{1}{2} \left\lfloor \frac{2x_1 + (-1)^{x_1} + 5}{3} \right\rfloor \right\rfloor - \Delta C_{(n)}$$

$$\pi_{(x_2)} - \pi_{(x_1)} = f_{(x_2)} - f_{(x_1)} - \Delta C_{(n)}$$

Recordando que:

$$\Delta C_{(n)} = C_{(x_2)} - C_{(x_1)} = \sum_{j=A(x_1)+1}^{A(x_2)} \text{Eit} \left(\sum_{i=1}^{m(x_2)} \text{Eit}(\beta_{(i,j)}) \right)$$

Sucesión de números primos

Para encontrar una sucesión de números primos, se debe reemplazar $n = x - x * \text{Cat}_{(x)}$, en la fórmula de primos de Beimar Wilfredo López Subia:

$$p_{(n)} = \frac{6n + 3 - (-1)^n}{2} \quad ; \quad n < 0$$

Donde la función:

$$\text{Cat}_{(x)} = \sum_{i=1}^{z(x)} \text{Eit} \left(\sum_{j=x}^x \text{Eit}(\beta_{(i,j)}) \right)$$

$$\text{para } z_{(x)} = \left\lfloor \frac{-1 + \sqrt{1 + 3x}}{3} \right\rfloor$$

Esta función puede reducirse por procesos anteriores, ya que como se puede ver $j = x$; eso significa que la una sumatoria puede eliminarse directamente.

Maneras de encontrar el valor $C_{(x)}$, para menores a un número dado:

Cabe destacar que, el avance se hace más profundo si existe el tiempo para seguir estudiando la fórmula publicada en el artículo; existe hasta el momento 7 formas de calcular la $\pi_{(x)}$, siendo que por fórmula de Beimar Wilfredo López Subia, se conoce:

$$\pi_{(x)} = f_{(x)} - C_{(x)}$$

Pero la facilidad y dificultad de usar esta fórmula, depende de cómo se calcula el valor de $C_{(x)}$; y aquí solo se muestra 3 formas de cálculo directo de $C_{(x)}$.

1era manera: Mediante la Criba de Beimar Wilfredo López Subia, explicada en este mismo PDF con el objetivo de enseñarse en colegios y carreras matemáticas de todo el mundo.

2da manera: Mediante la función $\beta_{(i,j)}$ de Beimar Wilfredo López Subia, que como se explicó anteriormente se puede usar otras que tienen el mismo objetivo, como las funciones $\alpha_{(i,j)}$ y $\gamma_{(i,j)}$.

Se muestra la función $\beta_{(i,j)}$:

$$\beta_{(i,j)} = \frac{4j - (-1)^j + (2i + 1)(-1)^{i+j} + (2i - 1)(-1)^i - 12i^2 + 5}{12i + 6 - 2(-1)^i}$$

y el valor de $C_{(x)}$:

$$C_{(x)} = \sum_{j=8}^{A(x)} \text{Eit} \left(\sum_{i=1}^{m(x)} \text{Eit}(\beta_{(i,j)}) \right)$$

Este es el caso particular usando la función $\text{Eit}(x)$. El valor de $C_{(x)}$, en este caso por conceptos anteriores se puede evitar también usar el valor de la función $\text{Eit}(x)$ de una de las sumatorias, cambiando el valor j cuando $\beta_{(i,j)}$ es entero. Recuerde la igualdad:

$$C_{(x)} = \sum_{j=8}^{A(x)} \text{Eit} \left(\sum_{i=1}^{m(x)} \text{Eit}(\beta_{(i,j)}) \right) = \sum_{j=8}^{A(x)} \text{Eit} \left(\sum_{i=1}^{m(x)} \text{Eit}(\alpha_{(i,j)}) \right)$$

Este es algoritmo para encontrar $C_{(x)}$, se muestra para verificar si el número es primo o no es primo; y usando la función $\alpha_{(i,j)}$:

```
def eit(x):
    if(x - int(x)) > 0 or x <= 0:
        return 0
    else:
        return 1
print("VERIFICA SI EL NÚMERO ES PRIMO, PRIMALIDAD DE BEIMAR WILFREDO LÓPEZ SUBIA")
num = input("INGRESE EL NÚMERO: ")
num = int(num)
a = (num-1)/3
b = (num-2)/3
if(a == int(a) and int(a) % 2 == 0) or (b == int(b) and int(b) % 2 != 0):
    if(a == int(a)): n = int(a)
    if(b == int(b)): n = int(b)
    cc = (-1 + (((1 + (3*n))**(1/2))))/3
    m = int(cc)
    k = 0
```

```

j = n
for i in range(1, m + 1):
    d = (6*i)-((-1)**i)+3
    h = -((-1)**j)+(6*(j-i))+((-1)**i)/d
    r = eit(h)
    k = r + k
if(eit(k) == 0):
    print(f"\n{num} ES PRIMO")
else:
    print(f"\n{num} NO ES PRIMO")
else:
    print(f"\n{num} NO ES PRIMO")

```

3ra manera: Mediante la función tridimensional $w_{(x,y)}$ de Beimar Wilfredo López Subia, que es la siguiente:

$$W_{(x,y)} = \frac{(1 - 2x - 2y)(-1)^x - (-1)^x + (1 + 2x)(-1)^{x+y} + 12x^2 + 6y + 12xy - 5}{4}$$

Donde el valor de $C_{(x)}$ es:

$$C_{(x)} = \sum^{k(x)} U(W_{(x,y)})$$

; para $(x, y) \in \mathbb{N}$; $\mathbb{N} = \{1,2,3, \dots\}$

Significa contar la cantidad de valores únicos (Símbolo de únicos es U), valores únicos de $W_{(x,y)}$ menores o iguales a $k_{(x)}$. Al reemplazar valores (x, y) , solo números naturales. En este caso se limita a que x no debe sobrepasar el límite:

$$\text{Limite}_{(x)} = \left\lfloor \frac{-1 + \sqrt{1 + 3 * k_{(x)}}}{3} \right\rfloor$$

$$\text{, donde: } k_{(x)} = \left\lfloor \frac{1}{2} \left[\frac{2x + (-1)^x - 7}{3} \right] \right\rfloor$$

Aquí se tiene un algoritmo en Python, para encontrar el $C_{(x)}$ de esta manera:

```

def valorB(a):
    return round(((2*a)+((-1)**a)-7)/6)
def formula(x, y):
    return ((1 - (2 * x) - (2 * y)) * ((-1) ** x) - ((-1) ** y) + (1 + (2 * x)) * ((-1) ** (x + y)) + (12 * x * x) + (6 * y) + (12 * x * y) - 5) / 4
def limiteX(b):
    return int((((-1+(1+3*b)**0.5))/3))

```

```

def cantidad(a, suma):
    return round(((2*a)+((-1)**a)-(6*suma)+5)/6)
def contarPrimos(a):
    vector=dict()
    b = valorB(a)
    limite = int(limiteX(b))
    con = 0
    x=1
    while (x<= limite):
        y = 1
        while True:
            w = formula(x, y)
            if(w>b):break
            vector[con] = w
            con = con + 1
            y=y+1
            x=x+1
        temp = {val : key for key, val in vector.items()}
        res = {val : key for key, val in temp.items()}
        return res
a=10000
print("NÚMEROS PRIMOS MENORES A ;a)
vector = contarPrimos(a)
suma = len(vector)
print("MEDIANTE LA FUNCIÓN W(X,Y) DE BEIMAR WILFREDO LÓPEZ SUBIA : ;cantidad(a, suma))
print("CANTIDAD DE NÚMEROS PRIMOS: ;cantidad(a, suma))

```

Formas de encontrar el valor $C_{(x)}$, para un rango dado:

Con todas las formas de encontrar $C_{(x)}$ se puede encontrar $\Delta C_{(n)} = C_{(x_2)} - C_{(x_1)}$ para encontrar la cantidad de primos en un rango dado. Por decir, en el caso de la función $W_{(x,y)}$ de Beimar Wilfredo López Subia, se puede apreciar:

$$C_{(n)} = \sum_{k_{(x_1)+1}^{k_{(x_2)}} U(W_{(x,y)})$$

; para $(x, y) \in \mathbb{N}$; $\mathbb{N} = \{1,2,3, \dots\}$

Que al igual que antes, significa contar la cantidad de valores únicos (Símbolo U), valores únicos de $W_{(x,y)}$ que sean mayores o iguales a $k_{(x_1)} + 1$, y menores o iguales a $k_{(x_2)}$.

Al reemplazar valores (x, y) , solo números naturales. El valor que limita a que x no debe cambiarse y se encuentra con el valor de x_2 :

$$\text{Limite}_{(x)} = \left\lfloor \frac{-1 + \sqrt{1 + 3 * k_{(x_2)}}}{3} \right\rfloor$$

$$, \text{donde: } k_{(x_2)} = \left\lfloor \frac{1}{2} \left\lfloor \frac{2x_2 + (-1)^{x_2} - 7}{3} \right\rfloor \right\rfloor$$

Y el valor de $k_{(x_1)}$, se encuentra:

$$k_{(x_1)} = \left\lfloor \frac{1}{2} \left\lfloor \frac{2x_1 + (-1)^{x_1} - 7}{3} \right\rfloor \right\rfloor$$

Recuerde que puede encontrar los primos en un rango entre x_1 y x_2 , tomando en cuenta siempre que $x_1 < x_2$.

Demostración matemática de la fórmula $\pi(x)$:

Sea $p > 3$ es primo, entonces se puede demostrar que $p = 6y + 1, p = 6y + 5$.

Tomando el valor $p = \frac{6j+3-(-1)^j}{2}$

- Si $j = 2n$, entonces $p = 6n + 1$
- Si $j = 2n + 1$, entonces $p = 6n + 5$

Se verifica que, para $j = 1 \rightarrow p = 5$

- $j = 2 \rightarrow p = 7$
- $j = 3 \rightarrow p = 11$
- $j = 4 \rightarrow p = 13$
- $j = 5 \rightarrow p = 17$
- $j = 6 \rightarrow p = 19$
- $j = 7 \rightarrow p = 23$
- $j = 8 \rightarrow p = 25$

Así solo para $j \geq 8$ un número de esa forma es compuesto.

Se $x \in \mathbb{N}$, busquemos el mayor valor de i tal que

$$P_j = \frac{6j+3-(-1)^j}{2} < x, \text{ Siempre recordando que:}$$

- Si $j = 2n$, entonces $p = 6n + 1$
- Si $j = 2n + 1$, entonces $p = 6n + 5$

De esa forma el mayor valor de j es:

x	$6n$	$6n + 1$	$6n + 2$	$6n + 3$	$6n + 4$	$6n + 5$
j	$2n - 1$	$2n - 1$	$2n$	$2n$	$2n$	$2n$

Figura 1. Relación entre x y j

Luego el valor máximo de j es $\left\lfloor \frac{x-2}{3} + \frac{(-1)^x}{6} \right\rfloor$.

$$j_f = \left\lfloor \frac{2x - 4 + (-1)^x}{6} \right\rfloor$$

Sea entonces:

$$C_{(x)} = \left\{ \begin{array}{l} p_j = \frac{6j + 3 - (-1)^j}{2} , \\ \text{para } j_j < x \text{ y } p_j \text{ compuesto} \end{array} \right\}$$

$$C_{(x)} = \#C_{(x)}$$

Eso garantiza que:

$$\pi(x) = \left\lfloor \frac{2x - 4 + (-1)^x}{6} \right\rfloor + 2 - C_{(x)}$$

NOTA: La demostración es super larga, pero en este lugar ya se da una breve idea; sin embargo, mejor se explicará sobre la aplicación más importante, que es la criba de Beimar Wilfredo López Subia.

La Criba de Beimar Wilfredo López Subia

La Criba de Beimar Wilfredo López Subia, sirve para encontrar la cantidad y cuáles son los números primos menores a un número dado. Para crear la criba, se debe reducir el número dado mediante una fórmula (aproximadamente al 33%), y luego debe trabajarse con una cantidad limitada (menor al 2% del número dado), que se encuentra mediante otra fórmula.

PARA TOMAR EN CUENTA: El valor de $(-1)^n$ solo representa un signo. Si n es PAR el valor de $(-1)^n$ es +1, y si n es IMPAR el valor de $(-1)^n$ es -1; como se muestra:

$$\cdot (-1)^{\text{PAR}} = +1$$

$$\cdot (-1)^{\text{IMPAR}} = -1$$

PASOS DE LA CRIBA:

PASO 1. Sea el número dado x , se debe reemplazar el número en lo siguiente:

$$L_{(x)} = \frac{2x + (-1)^x - 7}{6}, \text{ redondeando correctamente el valor de } L_{(x)}.$$

$$i_{(x)} = \frac{\sqrt{3 * L_{(x)} + 1} - 1}{3}, \text{ elegir directamente el entero se tiene } i_{(x)}.$$

PASO 2. Conocido el $i_{(x)}$ este valor debe ser el último valor i de una tabla; se debe anotar los valores de 1 a i en la primera columna, para luego llenar usando lo siguiente:

$$\cdot j_{(i)} = \frac{(-(-1)^i + 6i + 3)^2 - 4}{12}$$

$$\cdot a_{(i)} = 3i + 1 + i * (-1)^i$$

$$\cdot b_{(i)} = 3i + 2 - (1 + i) * (-1)^i$$

Se debe hallar para cada valor de i .

PASO 3. Conocida la tabla anterior (Denominada tabla "López"), porque es una tabla muy usada en esto. Debe crearse una tabla (Denominada tabla "Wilfredo") anotando de 1 a $L_{(x)}$ los números consecutivamente, y para cada valor de i de la tabla "López", debe marcarse los valores $j_{(i)}$, y $j_{(i)} + a$ luego ir marcando hasta el final de la tabla valores de $\#_{\text{anterior}} + b$, $\#_{\text{anterior}} + a$, $\#_{\text{anterior}} + b \dots$ (Vea ejemplo número para reconocer mejor cada tabla).

i	j(i)	a(i)	b(i)
1	8	3	7
2	16	9	5
⋮	⋮	⋮	⋮
i	#	#	#

Figura 2. La tabla López

PASO 4. Para encontrar la cantidad de números primos menores al número dado x , se debe contar la cantidad de números no marcados en la tabla creada de 1 a $L_{(x)}$, denominada tabla "Wilfredo"; y al resultado de contar no marcados sumar 2. La cantidad de números no marcados se denominará $B_{(x)}$. (Ver ejemplo numérico 1).

$$\cdot \pi_{(x)} = B_{(x)} + 2$$

También puede contar los marcados de tabla "Wilfredo"; y a esa cantidad denominarlo $C_{(x)}$ para luego restar de $f_{(x)}$ (Ver ejemplo numérico 2).

$$f_{(x)} = \frac{2x + (-1)^x + 5}{6}; \text{ se debe redondear correctamente.}$$

$$\pi_{(x)} = f_{(x)} - C_{(x)}$$

PASO 5. Para saber cuáles son los números primos menores a un número dado, desde la tabla "Wilfredo" se debe reemplazar los números sin marcar en $P_{(i)}$; y anotar el primo 2 y 3 en la sucesión. Así los primos serán: 2, 3, ... (Ver ejemplo numérico 3).

$$\cdot P_{(i)} = \frac{-(-1)^i + 6i + 3}{2}$$

EJEMPLOS NÚMERICOS: Primero se debe entender perfectamente este proceso, para implementarlo en los ejercicios con mejor entendimiento:

a). El valor de $(-1)^n$ solo representa un signo:

$$\cdot (-1)^{20} = +1, \text{ porque el 20 es PAR.}$$

$$\cdot (-1)^{3331} = -1, \text{ porque el 3331 es IMPAR.}$$

b). El valor de $L_{(x)}$ debe ser redondeado correctamente:

· $L_{(10)} = \frac{2 \cdot 10 + (-1)^{10-7}}{6} = \frac{7}{3} \cong 2.33$, el valor a usar es $L_{(10)} = 2$.

· $L_{(31)} = \frac{2 \cdot 31 + (-1)^{31-7}}{6} = 9$, el valor a usar es $L_{(31)} = 9$.

· $L_{(74)} = \frac{2 \cdot 74 + (-1)^{74-7}}{6} = \frac{71}{3} \cong 23.67$, el valor a usar es $L_{(74)} = 24$.

c). El valor de $i_{(x)}$ se debe elegir el entero (redondear siempre al número menor):

· $i_{(31)} = \frac{\sqrt{3 \cdot L_{(31)} + 1} - 1}{3} = \frac{\sqrt{3 \cdot 9 + 1} - 1}{3} \cong 1.43$, usar es $i_{(31)} = 1$.

· $i_{(74)} = \frac{\sqrt{3 \cdot L_{(74)} + 1} - 1}{3} = \frac{\sqrt{3 \cdot 24 + 1} - 1}{3} \cong 2.51$, usar es $i_{(74)} = 2$.

· $i_{(100)} = \frac{\sqrt{3 \cdot L_{(100)} + 1} - 1}{3} = \frac{\sqrt{3 \cdot 32 + 1} - 1}{3} \cong 2.94$, usar $i_{(74)} = 2$.

EJEMPLO NUMÉRICO 1: Hallar la cantidad de números primos menores al número 100.

PASO 1: Encontrar el valor $L_{(x)}$ y el valor $i_{(x)}$ para $x = 100$

· $L_{(x)} = \frac{2x + (-1)^{x-7}}{6}$
 $L_{(100)} = \frac{2 \cdot 100 + (-1)^{100-7}}{6} = \frac{100}{3} \approx 32.333$, redondeando correctamente el valor de $L_{(100)} = 32$.

· $i_{(x)} = \frac{\sqrt{3 \cdot L_{(x)} + 1} - 1}{3}$;
 $i_{(32)} = \frac{\sqrt{3 \cdot L_{(100)} + 1} - 1}{3} = \frac{\sqrt{3 \cdot 32 + 1} - 1}{3} \approx 2.616$ eligiendo directamente el entero se tiene $i_{(32)} = 2$.

PASO 2: Crear la tabla "López", tomando en cuenta que el último valor de i , es $i_{(32)} = 2$:

i	j(i)	a(i)	b(i)
1	8	3	7
2	16	9	5

Figura 3. La tabla López para $i=2$

Para hallar el valor $j_{(i)} = \frac{(-(-1)^i + 6i + 3)^2 - 4}{12}$:

· $j_{(1)} = \frac{(-(-1)^1 + 6 \cdot 1 + 3)^2 - 4}{12} = 8$

· $j_{(2)} = \frac{(-(-1)^2 + 6 \cdot 2 + 3)^2 - 4}{12} = 16$

Para el valor de $a_{(i)}$, usar la fórmula

$a_{(i)} = 3i + 1 + i \cdot (-1)^i$:

· $a_{(1)} = 3 \cdot 1 + 1 + 1 \cdot (-1)^1 = 3$

· $a_{(2)} = 3 \cdot 2 + 1 + 2 \cdot (-1)^2 = 9$

Para el valor de $b_{(i)}$, usar

$b_{(i)} = 3i + 2 - (1 + i) \cdot (-1)^i$:

· $b_{(1)} = 3 \cdot 1 + 2 - (1 + 1) \cdot (-1)^1 = 7$

· $b_{(2)} = 3 \cdot 2 + 2 - (1 + 2) \cdot (-1)^2 = 5$

PASO 3: Se crea la tabla "Wilfredo", anotando de 1 a $L_{(x)}$ consecutivamente. En este caso será de 1 a 32, porque

$L_{(x=100)} = 32$.

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32

Figura 4. La tabla Wilfredo

· Para $i = 1$,
 $8 + 3 = 11 + 7 = 18 + 3 = 21 + 7 = 28 + 3 = 31$

· Para $i = 2$, $16 + 9 = 25 + 5 = 30$

Verifique que para $i = 1, a = 3, b = 7$ y el valor de inicio $j_{(1)}$ es 8 (Vea la tabla "López"), y para $i = 2, a = 9, b = 5$ y el valor de inicio $j_{(2)}$ es 16. Vea que he sumado $+a, +b, +a, +b, \dots$ y las respuestas he marcado en la tabla.

Para $i=1$ los marcados son 11,18,21,28 y 31; y para $i=2$ los marcados son 25 y 30. Verifique que si quiero seguir sumando $+a, +b$ sobre los resultados ya se salen de la tabla "Wilfredo".

PASO 4: Para encontrar la cantidad de números primos menores al número 100, se debe contar los valores no marcados y eso denominar $B_{(x)}$, en este caso $B_{(100)} = 23$.

- $\pi_{(x)} = B_{(x)} + 2$
- $\pi_{(100)} = B_{(100)} + 2$
- $\pi_{(100)} = 23 + 2 = 25$

EJEMPLO NUMÉRICO 2: Hallar la cantidad de números primos menores al número 100, usando un método diferente al ejemplo numérico 1. Los pasos 1, 2 y 3 son los mismos en este ejercicio, así que saltaremos al paso 4.

PASO 4: Para encontrar la cantidad de números primos menores al número 100, se debe contar los valores marcados y eso denominar $C_{(x)}$, en este caso $C_{(100)} = 9$.

- $f_{(x)} = \frac{2x+(-1)^{x+5}}{6}$; se debe redondear correctamente.
- $f_{(100)} = \frac{2*100+(-1)^{100+5}}{6} = \frac{103}{3} \approx 34.333$ usar
 $f_{(100)} = 34$
- $\pi_{(x)} = f_{(x)} - C_{(x)}$
- $\pi_{(100)} = f_{(100)} - C_{(100)} = 34 - 9 = 25$

La cantidad de números primos menores que 100 es 25, sea por cualquier método.

EJEMPLO NUMÉRICO 3: Encontrar cuales son los números primos menores al número 100. Los pasos 1, 2 y 3 son los mismos en este ejercicio, y evitar el paso 4 para así saltar directamente al paso 5.

PASO 5: Desde la tabla "Wilfredo", se debe tomar en cuenta los números que no están marcados. En este caso: 1,2,3,4,5,6,7,9,10,12,13,14,15,17,19,20,22,23,24,26,27,29 y 32; serán los valores de i (valores a reemplazar en la fórmula):

$$p = \frac{-(-1)^i + 6i + 3}{2}, \text{ ya se supone que el 2 y 3 es primo; los demás son:}$$

i	1	2	3	4	5	6	7	9	10	12	13	14
Pi	5	7	11	13	17	19	23	29	31	37	41	43
i	15	17	19	20	22	23	24	26	27	29	32	
Pi	47	53	59	61	67	71	73	79	83	89	97	

Figura 5. Resultado de Primos menores a 100

ALGORITMO DE LA CRIBA: Algoritmo en Python.

```
import math
x=10**5
limitex = round(((2*x + (-1)**x - 1) / 6))
limitel = int(1/3 * (math.sqrt(3*limitex+1) - 1))
print("Limite en x : ",limitex)
vector = dict()
for i in range(1, limitex):
    vector[i] = "True"
for i in range(1, limitel):
    j = ((3 + 6*i - (-1)**i)**2 - 4) / 12
    a = 3*i + 1 + i*(-1)**i
    b = 3*i + 2 - (1 + i)*(-1)**i
    vector[j] = "False"
if(j > limitex): break
while(True):
    vector[j] = "False"
    j = j + a
    if(j > limitex):break
    vector[j] = a
    j = j + b
    if(j > limitex):break
    if(j<0):break
    vector[j] = "False"
verdaderos = 0
```

for i in vector:

if vector[i]=="True":

verdaderos = verdaderos + 1

print("numero de primos =", verdaderos + 2)

$$\frac{-(-1)^j + 6j + 3}{2}$$

RESULTADOS

La demostración de la fórmula contadora de números primos menores a un número dado; es correcta y puede inclusive explicarse en colegio, gracias a su aplicación que es la criba de Beimar Wilfredo López Subia.

Los algoritmos, fórmulas nuevas, estrategias y avances totalmente inéditos; para estudiar el número primo con detalle. Se muestra en Python para que cualquiera pueda verificarlo, de la mejor manera posible y analizar el número primo desde diferentes puntos de vista.

La criba de Beimar Wilfredo López Subia, es correcta y esta lista para explicarse en colegio; y será algo totalmente novedoso para que el estudiante miré al número primo, desde otro punto de vista, como el saber la cantidad de números primos menores al número sin contar números primos e inclusive sin conocerlos todavía.

Si desea conocer el primo, puede conocer el número primo, puede hacerlo de manera rápida usando una fórmula sencilla, y sin uso de calculadora; porque está explicada para colegio.

Se ha realizado avances en la fórmula contadora de números primos, como la siguiente:

$$\frac{(4 * j - ((-1)^j) + ((2 * i + 1) * (-1)^{j+1}) + ((2 * i - 1) * (-1)^j) - (12 * i * j) + 5)}{12 * i + 6 - (2 * (-1)^j)}$$

que puede ser sustituida por otra mucho más simple:

$$\frac{-(-1)^j + 6j + 3}{-(-1)^j + 6i + 3} - 1$$

o inclusive:

$$\frac{-(-1)^j + 6j + 3}{-(-1)^j + 6i + 3}$$

Si se altera el intervalo de la suma de i

En esta y otras fórmulas se entiende el papel del número candidato a primo es mediante:

El resultado más notable, es que se ha llegado a sacar nuevas formas de calcular $C_{(x)}$, con el fin de facilitar el manejo de la fórmula; y garantizar que puede estudiarse desde diferentes puntos de la matemática, en la teoría de números especialmente.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado rigurosamente la fórmula contadora de números primos menores a un número dado; y gracias a ser correcta se ha encontrado la criba de Beimar Wilfredo López Subia, que puede ser explicada en el colegio.

Se ha mostrado algoritmos, fórmulas nuevas, estrategias y avances totalmente inéditos; para estudiar el número primo con detalle.

La criba de Beimar Wilfredo López Subia, está avalada mediante ejemplos numéricos, para que puede explicarse en el colegio de manera manual y así el estudiante puede aprender a encontrar la cantidad de números primos menores al número dado, sin conocer el número primo.

Si el estudiante desea conocer el número primo, puede hacerlo de manera rápida usando una fórmula sencilla, y sin uso de calculadora.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LOPEZ SUBIA, Beimar Wilfredo. Fórmula para hallar la cifra de números primos menores que una cantidad dada. Rev. Cien. Tec. In. [online]. 2020, vol.18, n.22, pp.125-148. ISSN 2225-8787.
- Gracián, E. (2010). Los números primos. RBA LIBROS.
- Dominic, W. (2019). El origen del teorema de los números primos. MAA CONVERGENCE.
- Jara, V. & Sánchez, C. (2020). Nueva prueba de que la suma de los recíprocos de Primos diverge. MDPI MATHEMATICS



Variabilidad inherente en la determinación del esfuerzo de preconsolidación de suelos mediante ensayos edométricos convencionales

A. J. Aparicio-Ortubé^a, Exneyder A. Montoya-Araque^b y David G. Zapata-Medina^c

^a Estudiante de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín, ANT 050034, Colombia. E-mail: aaparicioo@unal.edu.co

^b Asistente de Investigación Graduado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín, ANT 050034, Colombia. E-mail: eamontoyaa@unal.edu.co

^c Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín, ANT 050034, Colombia. E-mail: dgzapata@unal.edu.co

RESUMEN

Este artículo examina la variabilidad inherente en la determinación del esfuerzo de preconsolidación, σ'_p , de suelos de métodos generalmente empleados en la investigación y práctica geotécnica mediante ensayos edométricos convencionales. Nueve métodos fueron evaluados: Casagrande, Pacheco Silva, Butterfield, Oikawa, Becker et al., Morin, Onitsuka et al., Wang & Frost y Boone. La discusión se centra en la aproximación lineal de los rangos de recompresión y compresión, los cuales causan variabilidad en la determinación de σ'_p . Dos criterios fueron tomados en cuenta para la aproximación lineal del rango de compresión: pendiente máxima entre dos incrementos consecutivos de carga y últimos tres incrementos de carga; y para el rango de recompresión: primer y último punto de la primera etapa de descarga, todos los puntos de la primera etapa de descarga, incrementos de carga por debajo del esfuerzo vertical *in situ*, σ'_{v0} , y encima de σ'_{v0} de acuerdo al método usado. Los resultados mostraron que los métodos propuestos por Casagrande, Pacheco Silva y Boone tienen la menor variabilidad inherente en la determinación de σ'_p para las condiciones aquí evaluadas.

Palabras clave: esfuerzo de preconsolidación, suelo, ensayo edométrico convencional.

ABSTRACT

This paper examines the inherent variability in the determination of the preconsolidation pressure, σ'_p , of soils of methods typically employed in research and geotechnical practice via conventional oedometer testing. Nine methods were evaluated: Casagrande, Pacheco Silva, Butterfield, Oikawa, Becker et al., Morin, Onitsuka et al., Wang & Frost, and Boone. The discussion is centered on the linear approximation of the recompression and compression ranges which cause variability in the determination of σ'_p . Two criteria were taken into account to the linear approximation of the compression range: maximum slope between two consecutive load increments, and last three load increments; and for the recompression range: first and last point of the first unloading stage, all the points of the first unloading stage, load increments below the *in situ* effective vertical stress, σ'_{v0} , and above σ'_{v0} according to the method used. The results showed that the method proposed by Casagrande, Pacheco Silva, and Boone have the smallest inherent variability in the determination of σ'_p for the conditions herein evaluated.

Key words: preconsolidation pressure, soil, conventional oedometer testing.

INTRODUCCIÓN

Desde 1936, varios métodos se han propuesto para determinar el esfuerzo de preconsolidación, σ'_p , de suelos a través de la respuesta de compresibilidad unidimensional, la cual es obtenida por medio de ensayos de laboratorio de compresión bajo condiciones de deformación lateral restringida (i.e., condiciones K_0 o edométricas). El comportamiento del suelo observado por medio de estos ensayos muestra una respuesta "bilineal", desde una respuesta relativamente rígida a otra más blanda, definiéndose esta transición como σ'_p . Este cambio de rigidez que experimenta el suelo ante la acción de cargas de compresión está asociado a la historia de esfuerzos del material, por tanto, si el suelo es sometido a un nivel de esfuerzo mayor al que ha experimentado durante su historia geológica, cambios importantes en su estructura se inducirán. La determinación de este parámetro mecánico, también llamado esfuerzo de cedencia, es esencial para predecir asentamientos y distorsiones en el diseño de cimentaciones superficiales, así como también para entender la respuesta mecánica del suelo en términos de rigidez y resistencia.

La interpretación de σ'_p a través de la curva de compresibilidad no solo depende del método empleado sino también de la calidad de la muestra ensayada. Investigaciones sobre los efectos de la perturbación de la muestra en la respuesta mecánica del suelo han mostrado que el muestreo, transporte y almacenaje inadecuado, preparación del espécimen de suelo, manipuleo y técnicas empleadas durante el ensayo alteran la estructura del suelo (Bjerrum, 1973; Cho et al., 2007; Clayton et al., 1992; Hight, 2001; Olson, 1986), "oscureciendo" el cambio de rigidez en la curva de compresibilidad. Los criterios sugeridos por Andresen & Kolstad (1979) y Lunne et al. (2006) posibilitan evaluar el nivel de perturbación o calidad de la muestra con datos de ensayos edométricos, clasificándola en los siguientes niveles: muy buena a excelente, buena, regular, pobre y muy pobre. Terzaghi et al. (1996) indican que los ensayos de laboratorio realizados con muestras de suelo de calidad buena o superior (e.g., muestras de bloque, Sherbrooke, Laval, pistón fijo o tubos Shelby de pared delgada) proporcionan parámetros mecánicos representativos de las condiciones *in situ*.

Los métodos existentes para determinar σ'_p generalmente involucran construcciones gráficas, la aproximación visual de los rangos de recompresión y compresión en trayectorias rectas y/o la determinación de la mag-

nitud de σ'_p sobre el espacio de análisis, en ocasiones en escala logarítmica, también de forma visual. Estos procedimientos reducen la objetividad de los métodos y repetibilidad en la obtención de la magnitud de σ'_p . Li (1989) demostró que la evaluación visual de la respuesta de compresibilidad es influenciada por el tamaño del gráfico y las escalas del espacio de análisis, incluso en espacios aritméticos, indicando que una curva puede enderezarse o viceversa por un cambio o ajuste de escalas. Clementino (2005) evaluó el efecto de la escala en la percepción visual usando el método de Casagrande, concluyendo que a medida que se incrementa la escala del eje de la relación de vacíos, e , la magnitud de σ'_p tiende a disminuir. Si bien las observaciones arriba descritas pueden evitarse mediante la implementación de métodos analíticos y numéricos, el ajuste lineal de los rangos de recompresión y compresión aún siguen siendo subjetivos ya que depende del analista geotécnico determinar la cantidad de puntos o incrementos de carga, causando de esta forma una variabilidad inherente en la determinación de σ'_p .

Este trabajo examina la variabilidad inherente en la determinación de σ'_p de métodos comúnmente usados en la comunidad geotécnica, como los propuestos por: Casagrande (1936), Pacheco Silva (1970), Butterfield (1979), Oikawa (1987), Becker et al. (1987), Morin (1988), Onitsuka et al. (1995), Wang & Frost (2004) y Boone (2010). Métodos analíticos y numéricos son empleados por medio del software de aplicación *pySigmaP* desarrollado por Montoya-Araque et al. (2020) para obtener una evaluación más objetiva de la variabilidad inherente. La evaluación es realizada en función de criterios existentes que no dependen del tamaño del gráfico y escalas del espacio de análisis. Dos criterios son tomados en cuenta para la aproximación lineal del rango de compresión: pendiente máxima entre dos incrementos consecutivos de carga y últimos tres incrementos de carga; y cuatro criterios para el rango de recompresión: primer y último punto de la primera etapa de descarga, todos los puntos de la primera etapa de descarga, incrementos de carga por debajo del esfuerzo vertical *in situ*, σ'_{vo} , y encima de σ'_{vo} de acuerdo al empleado. Adicionalmente, los procedimientos para calcular σ'_p de los métodos en estudio son descritos y presentados en el Apéndice.

EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD INHERENTE

La Tabla 1 resume los criterios de evaluación de la variabilidad inherente en la determinación de σ'_p de nueve métodos: Casagrande, Pacheco Silva, Butterfield, Oikawa, Becker et al., Morin, Onitsuka et al., Wang & Frost y Boone.

Tabla 1. Criterios de evaluación de la variabilidad inherente.

Criterio	Método
RC1	Todos los métodos en estudio
RC2	Todos los métodos en estudio
RR1	Wang & Frost, Boone
RR2	Wang & Frost, Boone
RR3	Butterfield, Oikawa, Becker et al., Morin, Onitsuka et al.
RR4	Butterfield, Oikawa, Becker et al., Morin, Onitsuka et al.

Nota: RC1: pendiente máxima entre dos incrementos consecutivos de carga; RC2: últimos tres incrementos de carga; RR1: primer y último punto de la primera etapa de descarga; RR2: todos los puntos de la primera etapa de descarga; RR3: incrementos de carga por debajo de σ'_{v0} ; RR4: incrementos de carga por encima de σ'_{v0} .

Los criterios listados en la Tabla 1 fueron seleccionados en base a recomendaciones encontradas en la literatura y práctica común para aproximar linealmente los rangos de compresión y recompresión. RC1, RC2 y RR3 fueron sugeridos por Ladd & Degroot (2003), Wang & Frost (2004) y Becker et al. (1987), respectivamente. Todos estos criterios serán combinados en todas sus formas posibles con el fin de determinar rangos de variabilidad a través de magnitudes mínimas y máximas de σ'_p de los métodos en estudio.

La Tabla 2 y Figura 1 muestran los resultados de un ensayo edométrico por carga incremental realizado en un espécimen cortado a mano de 20 mm de altura y 50 mm de diámetro (relación altura-diámetro de 0.4) usando una relación de carga incremental (LIR) de 1.0 y siguiendo el método B de la ASTM D2435 (2011). El material fue extraído en tubo Shelby de pared delgada de un depósito arcilloso a 12 m de profundidad ($\sigma'_{v0} \gg 150$ kPa), clasificado como arcilla de alta plasticidad (CH). El nivel freático fue encontrado a 5 m de profundidad. Note que la relación de vacíos inicial, e_0 , fue insertada en la primera fila de la Tabla 2.

Tabla 2. Ensayo edométrico por carga incremental.

σ'_v [kPa]	ϵ_a [%]	e	Etapa
---	---	0.852	Carga
6	2.53	0.805	
12	2.76	0.801	
25	3.06	0.795	
50	3.38	0.789	
100	3.90	0.779	
200	4.76	0.764	
400	6.57	0.730	
800	11.17	0.645	Descarga
400	11.07	0.647	
200	10.84	0.651	
100	10.60	0.655	Carga
200	10.63	0.655	
400	10.99	0.648	
800	11.67	0.635	
1600	15.38	0.567	Descarga
800	15.18	0.570	
400	14.94	0.575	

Nota: σ'_v : esfuerzo vertical efectivo; ϵ_a : deformación unitaria axial.

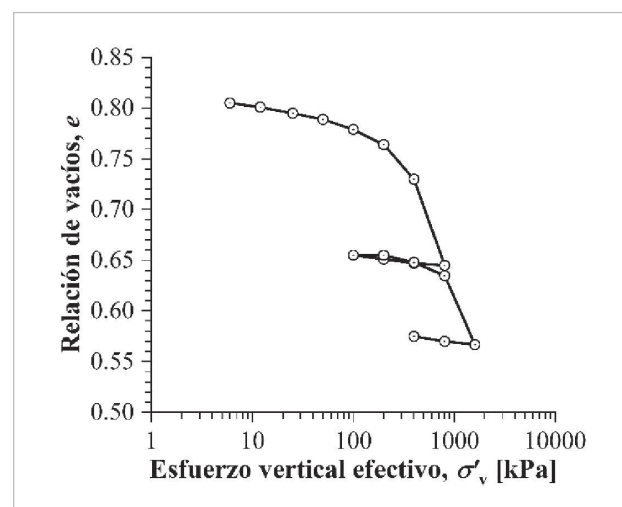


Figura 1. Ensayo edométrico por carga incremental.

RESULTADOS

La Tabla 3 y Figura 2 presentan los resultados de la evaluación de la variabilidad inherente en función del espacio de análisis de los métodos en estudio (i.e., $e\text{-log}\sigma'_v$, bilogarítmicos y energía de deformación). Debido a la cantidad de valores de σ'_p determinados, solo se ilustran un resultado por método en el Apéndice. El punto de máxima curvatura en el método de Casagrande fue determinado por diferenciación a través de un ajuste polinomial de cuarto orden sobre los puntos de la curva de compresibilidad igualado a cero. Este criterio es sugerido por Arvidsson & Keller (2004) para una determinación más objetiva de σ'_p .

Los resultados muestran que los métodos de Casagrande, Pacheco Silva y Boone, en el espacio de análisis $e\text{-log}\sigma'_v$, tienen la menor variabilidad inherente. Esto se debe a que estos métodos, a excepción del método de Boone, solo requieren la aproximación lineal del rango de compresión. Note en la Figura 2 que los valores de σ'_p determinados por el método de Casagrande se encuentran más alejados en comparación con la media aritmética de todos los valores de σ'_p obtenidos ($\sigma'_{p, promedio} \approx 304$ kPa). Esta observación sugiere que el método de Boone es el más adecuado entre los tres. Los métodos bilogarítmicos de Butterfield, Oikawa y Onitsuka et al. dieron resultados iguales, lo que sugiere que pueden usarse indistintamente. Los métodos de Becker et al., Morin y Wang & Frost tienen la mayor variabilidad inherente, aunque el método de Wang & Frost es ligeramente mayor al de los métodos bilogarítmicos. Dado que estos métodos son más sensibles a la selección de incrementos de carga para aproximar los rangos de compresión y recompresión en líneas rectas, se recomienda emplear un mayor "juicio ingenieril" al momento de determinar σ'_p .

Tabla 3. Variabilidad inherente en la determinación de σ'_p .

Método	σ'_p [kPa]	Rango [kPa]	Criterio
Casagrande	348	7	RC1
Casagrande	341	(2.1%)	RC2
Pacheco Silva	286	10	RC1
Pacheco Silva	276	(3.6%)	RC2
Boone	294		RC1-RR1
Boone	294	7	RC1-RR2
Boone	287	(2.4%)	RC2-RR1
Boone	287		RC2-RR2
Butterfield	289		RC1-RR3
Butterfield	305	20	RC1-RR4
Butterfield	285	(7.0%)	RC2-RR3
Butterfield	302		RC2-RR4
Oikawa	289		RC1-RR3
Oikawa	305	20	RC1-RR4
Oikawa	285	(7.0%)	RC2-RR3
Oikawa	302		RC2-RR4
Onitsuka et al.	289		RC1-RR3
Onitsuka et al.	305	20	RC1-RR4
Onitsuka et al.	285	(7.0%)	RC2-RR3
Onitsuka et al.	302		RC2-RR4
Becker et al.	323		RC1-RR3
Becker et al.	339	43	RC1-RR4
Becker et al.	296	(14.5%)	RC2-RR3
Becker et al.	312		RC2-RR4
Morin	323		RC1-RR3
Morin	339	43	RC1-RR4
Morin	296	(14.5%)	RC2-RR3
Morin	312		RC2-RR4
Wang & Frost	321		RC1-RR1
Wang & Frost	321	27	RC1-RR2
Wang & Frost	294	(9.2%)	RC2-RR1
Wang & Frost	295		RC2-RR2

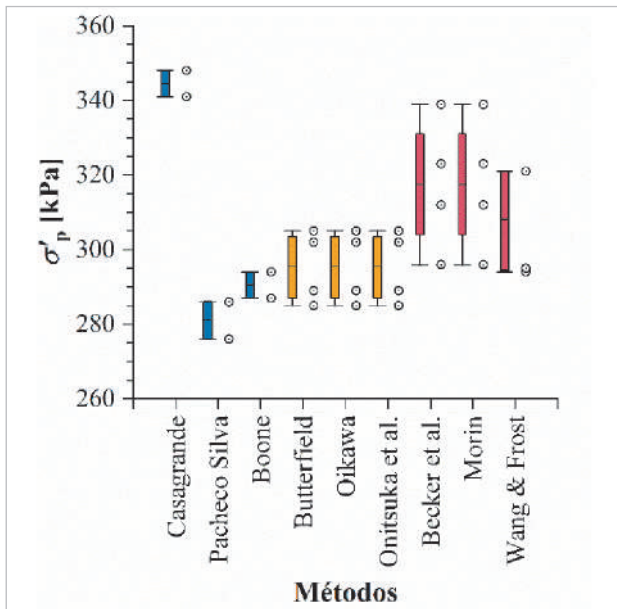


Figura 2. Variabilidad inherente en la determinación de σ'_p .

Si bien la variabilidad inherente puede considerarse como un indicador mínimo de la dispersión de valores que puede obtenerse al utilizar un método para determinar σ'_p , este criterio no es absoluto para definir cuál es el mejor. Por lo tanto, se sugiere tomar estos resultados como punto de partida al momento de interpretar σ'_p con datos de ensayos edométricos por carga incremental.

CONCLUSIONES

La variabilidad inherente en la determinación de σ'_p de suelos de nueve métodos generalmente usados en la comunidad geotécnica mediante ensayos edométricos convencionales fue examinada en este artículo. Dos criterios para la aproximación lineal del rango de compresión y cuatro para el rango de recompresión fueron analizados. Métodos analíticos y numéricos, a través del software de aplicación *pySigmaP*[®], fueron empleados para obtener una evaluación más objetiva.

A partir de la información presentada aquí, se concluye que los métodos de Casagrande, Pacheco Silva y Boone tienen la menor variabilidad inherente, seguido por los métodos bilogarítmicos, i.e., método de Butterfield, Oikawa y Onitsuka et al. y finalmente por los métodos basa-

dos en energía de deformación, i.e., Becker et al., Morin y Wang & Frost.

El procedimiento aquí empleado para obtener la variabilidad inherente en la determinación de σ'_p puede extenderse a otras respuestas de compresibilidad en función del grado de sobreconsolidación y forma, como también a otros ensayos de laboratorio, como ser ensayo edométrico a velocidad de deformación constante (CRS), a velocidad de carga constante (CRL) y en cámara triaxial (pseudo K_0 -TX).

AGRADECIMIENTOS

Apoyo financiero fue proporcionado por COLCIENCIAS, Programa No. 757-2016. Datos de laboratorio fueron proporcionados por INTEINSA. El apoyo de estas instituciones es altamente apreciado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andresen, A., & Kolstad, P. (1979). The NGI 54 mm Sampler for Undisturbed Sampling of Clays and Representative Sampling of Coarser Materials. *International Symposium of Soil Sampling*, 13–21.
- Arvidsson, J., & Keller, T. (2004). Soil Precompression Stress. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.01.003>
- ASTM D2435. (2011). *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. ASTM.
- Becker, D. E., Crooks, J. H. A., Been, K., & Jefferies, M. G. (1987). Work as a Criterion for Determining In Situ and Yield Stresses in Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(4), 549–564. <https://doi.org/10.1139/t87-070>
- Bjerrum, L. (1973). Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays, State of the Art Report. *Proc. of 8th ICSMFE, Moscow*, 109–159.
- Boone, S. J. (2010). A Critical Reappraisal of “Preconsolidation Pressure” Interpretations using the Oedometer Test. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(3), 281–296. <https://doi.org/10.1139/T09-093>
- Butterfield, R. (1979). A Natural Compression Law for Soils (an advance on $e - \log p'$). *Géotechnique*, 29(4), 469–

480. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.4.469>

Casagrande, A. (1936). The Determination of Pre-consolidation Load and its Practical Significance. *1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, 60–64.

Cho, W., Holman, T., Jung, Y., & Finno, R. (2007). Effects of Swelling During Saturation in Triaxial Tests in Clays. *Geotechnical Testing Journal*, 30(5), 378–386. <https://doi.org/10.1520/GTJ100797>

Clayton, C. R. I., Hight, D. W., & Hopper, R. J. (1992). Progressive Deconstructing of Bothkennar Clay. Implications for Sampling and Reconsolidation Procedures. *Géotechnique*, 42(2), 219–239. <https://doi.org/10.1680/geot.1992.42.2.219>

Clementino, R. V. (2005). Discussion of “An Oedometer Test Study on the Preconsolidation Stress of Glaciomarine Clays.” *Canadian Geotechnical Journal*, 42(3), 972–974. <https://doi.org/10.1139/t05-010>

Hight, D. W. (2001). Sampling Effects in Soft Clay: An Update on Ladd and Lambe (1963). *Soil Behavior and Soft Ground Construction*, 86–121. [https://doi.org/10.1061/40659\(2003\)4](https://doi.org/10.1061/40659(2003)4)

Ladd, C. C., & Degroot, D. J. (2003). Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization. *12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 0–55.

Li, K. S. (1989). Work as a Criterion for Determining In Situ and Yield Stresses in Clays: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(2), 324–326. <https://doi.org/10.1139/t89-041>

Lunne, T., Berre, T., Andersen, K. H., Strandvik, S., & Sjørsen, M. (2006). Effects of Sample Disturbance and Consolidation Procedures on Measured Shear Strength of Soft Marine Norwegian Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(7), 726–750. <https://doi.org/10.1139/t06-040>

Montoya-Araque, E., Aparicio-Ortubé, A. J., Zapata-Medina, D. G., & Arboleda-Monsalve, L. G. (2020). *pySigmaP* (0.1.8). <https://pypi.org/project/pysigmaP/>

Morin, P. (1988). Work as a Criterion for Determining In Situ and Yield Stresses in Clays: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(4), 845–847. <https://doi.org/10.1139/t88-096>

Oikawa, H. (1987). Compression Curve of Soft Soils. *Soils and Foundations*, 27(3), 99–104. https://doi.org/10.3208/sandf1972.27.3_99

Olson, R. E. (1986). State of the Art: Consolidation Testing. In *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation* (pp. 7–70). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP346065>

Onitsuka, K., Hong, Z., Hara, Y., & Yoshitake, S. (1995). Interpretation of Oedometer Test Data for Natural Clays. *Soils and Foundations*, 35(3), 61–70. <https://doi.org/10.3208/sandf.35.61>

Pacheco Silva, F. (1970). A New Graphical Construction for Determination of the Preconsolidation Stress of a Soil Sample. *Proceedings of the 4th Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, 225–232.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (Third Edit). John Wiley & Sons.

Wang, L. B., & Frost, J. . D. (2004). Dissipated Strain Energy Method for Determining Preconsolidation Pressure. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(4), 760–768. <https://doi.org/10.1139/t04-013>

APÉNDICE

A.1. Resultados

A continuación se ilustran las determinaciones de σ'_p un ejemplo por cada método evaluado.

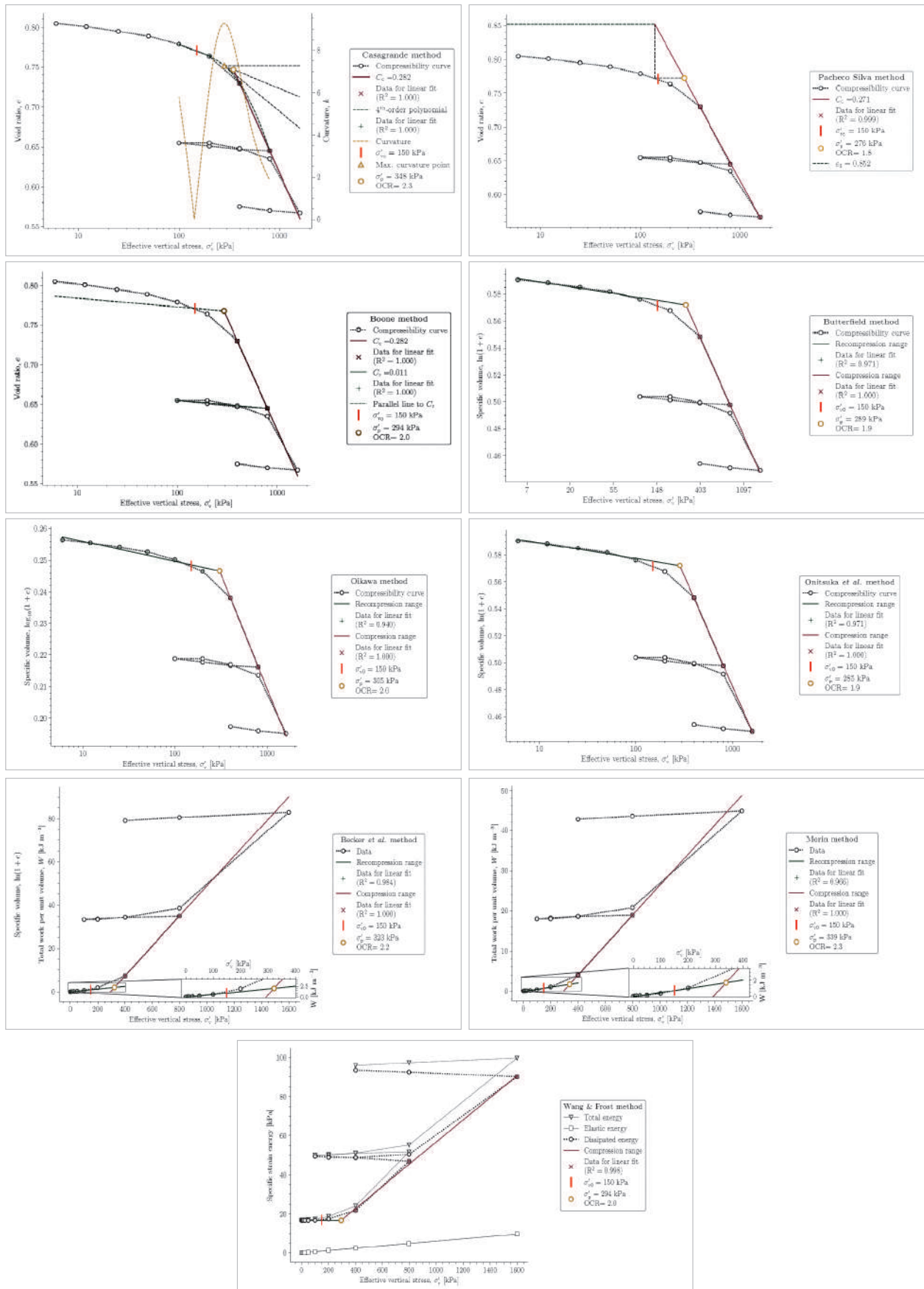


Figura A.1. Determinación de σ'_p por el método de Casagrande, Pacheco Silva, Boone, Butterfield, Oikawa, Onitsuka et al., Becker et al., Morin y Wang & Frost.

A.2. Métodos para determinar σ'_p

A continuación se describen los procedimientos para determinar σ'_p de los métodos en estudio.

- Método de Casagrande: (1) en el espacio $e\text{-log}\sigma'_v$, estime el punto de máxima curvatura; (2) dibuje una línea tangente y horizontal a partir de este punto; (3) dibuje una línea bisectando el ángulo entre la línea horizontal y tangente; (4) extienda la porción lineal más empinada del rango de compresión hasta intersectar la bisectriz; y (5) el punto de intersección define σ'_p .
- Método de Pacheco Silva: (1) en el espacio $e\text{-log}\sigma'_v$, dibuje una línea horizontal a la altura de e_0 ; (2) extienda la porción lineal del rango de compresión hasta intersectar la línea horizontal a la altura de e_0 ; (3) a partir de este punto, dibuje una línea vertical hasta intersectar la curva de compresibilidad; (4) a partir de este punto, dibuje una línea horizontal hasta intersectar la extensión del rango de compresión; y (5) el punto de intersección define σ'_p .
- Método de Butterfield: (1) en el espacio $\ln(1+e)\text{-ln}\sigma'_v$, aproxime el rango de recompresión con una línea recta; (2) aproxime el rango de compresión con una línea recta; y (3) el punto de intersección define σ'_p .
- Método de Oikawa: (1) en el espacio $\log(1+e)\text{-log}\sigma'_v$, aproxime el rango de recompresión con una línea recta; (2) aproxime el rango de compresión con una línea recta; y (3) el punto de intersección define σ'_p .
- Método de Becker et al.: calcule el trabajo por unidad de volumen para cada incremento de carga, ΔW , como:

$$\Delta W = \left[\frac{\sigma'_{v,i} + \sigma'_{v,i+1}}{2} \right] (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad \text{Eq. (1)}$$

donde ε es la deformación natural incremental e i denota el incremento de carga. (1) en el espacio $W\text{-}\sigma'_v$, aproxime el rango de recompresión con una línea recta; (2) aproxime el rango de compresión

con una línea recta; y (3) el punto de intersección define σ'_p .

- Método de Morín: calcule el trabajo por unidad de volumen para cada incremento de carga, ΔW , como:

$$\Delta W = \left[\frac{\sigma'_{v,i} + \sigma'_{v,i+1}}{2} \right] \frac{(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)}{1 + e_0} \quad \text{Eq. (2)}$$

(1) en el espacio $W\text{-}\sigma'_v$, aproxime el rango de recompresión con una línea recta; (2) aproxime el rango de compresión con una línea recta; y (3) el punto de intersección define σ'_p .

- Método de Onitsuka et al.: (1) en el espacio $\ln(1+e)\text{-log}\sigma'_v$, aproxime el rango de recompresión con una línea recta; (2) aproxime el rango de compresión con una línea recta; y (3) el punto de intersección define σ'_p .
- Método de Wang & Frost: calcule la energía de deformación total incremental (ITSE), ΔE_i^t , para cada incremento de carga como:

$$\Delta E_i^t = \left[\frac{\sigma'_{v,i} + \sigma'_{v,i+1}}{2} \right] (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad \text{Eq. (3)}$$

la energía de deformación total acumulada (ATSE), E_i^t , como:

$$E_i^t = \sum_{k=1}^i E_k^t \quad \text{Eq. (4)}$$

la energía de deformación elástica acumulada (AESE), E_i^e , como:

$$E_i^e = \frac{C_r \sigma'_{v,i}}{1 + e_0} \quad \text{Eq. (5)}$$

donde C_r es el índice de recompresión en el ciclo descarga-recarga. Calcule la energía de deformación disipada acumulada (ADSE), E_i^d , como:

$$E_i^d = E_i^t - E_i^e \quad \text{Eq. (6)}$$

determine el intercepto, OR, y la pendiente del rango de compresión, m , realizando un ajuste lineal con los

últimos tres valores de $\sigma'_{v,i}$ y E_i^d . Calcule la energía de deformación total acumulada corregida (ATSEC) como:

$$ATSEC = ATSE + OR \quad \text{Eq. (7)}$$

la energía de deformación disipada acumulada corregida (ADSEC) como:

$$ADSEC = ADSE + OR \quad \text{Eq. (8)}$$

y σ'_p como:

$$\sigma'_p = \frac{OR}{m} \quad \text{Eq. (9)}$$

(1) En el espacio SSE- σ'_v , dibuje la pendiente, m ; (2) dibuje una línea horizontal a la altura de OR; y (3) el punto de intersección define σ'_p .

- Método de Boone: (1) en el espacio e - $\log \sigma'_v$, localice el incremento de carga igual a σ'_{v0} para determinar la relación de vacíos *in situ*, e_{v0} . Si la curva de compresibilidad no incluye este incremento de carga, determine σ'_{v0} y e_{v0} por interpolación; (2) extienda la pendiente donde el índice de compresión entre dos incrementos consecutivos de carga es máximo, $C_{c \max}$. El esfuerzo más grande y la relación de vacíos más pequeña en $C_{c \max}$ son $\sigma'_{v \max}$ y e_{\min} , respectivamente; (3) determine C_r del ciclo descarga-recarga, dibuje una línea paralela en σ'_{v0} y calcule los valores del intercepto a lo largo del eje de la relación de vacíos para las líneas del índice de compresión, e_c y recompresión, e_r , como:

$$e_c = C_{c \max} \log (\sigma'_{v \max}) + e_{\min} \quad \text{Eq. (10)}$$

$$e_r = C_r \log (\sigma'_{v0}) + e_{v0} \quad \text{Eq. (11)}$$

(4) calcule y dibuje el punto de intersección de las líneas definidas por $C_{c \max}$ y C_r (en σ'_{v0}) como:

$$e_p = \left(\frac{e_c}{C_{c \max}} - \frac{e_r}{C_r} \right) / \left(\frac{1}{C_{c \max}} - \frac{1}{C_r} \right) \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\sigma'_p = 10^{[(e_c - e_p) / C_{c \max}]} \quad \text{Eq. (13)}$$

donde e_p y σ'_p son la relación de vacíos al nivel del esfuerzo de preconsolidación y el esfuerzo de preconsolidación, respectivamente.



Validación de la precipitación estimada en modelos climáticos globales del CMIP6 para la Cuenca Tupiza

Fernández, S^a, Fernández, C^b

^a Investigador en el área de recursos hídricos y cambio climático del Instituto de Aguas de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: sergio.fernandezm9@gmail.com.

^b Docente de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: cristian_ck2@hotmail.com.

RESUMEN

Los diferentes modelos de circulación general generados en la sexta fase de intercomparación de modelos acoplados CMIP6 que se aguarda su publicación y principales resultados en el sexto informe del IPCC ya se encuentran disponibles en su mayoría para ser usados en las diversas investigaciones. Es importante resaltar que cada vez se van reduciendo las incertidumbres de las predicciones y simulaciones de las diferentes variables atmosféricas, además que la tecnología permite cada vez obtener modelos con mayor resolución.

La falta de investigaciones en nuestro país sobre los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y su evaluación integral con las variables atmosféricas nos mantienen en un contexto vulnerable a desastres naturales, sin dar la importancia necesaria y anticipada de adaptación y mitigación del cambio climático.

Precisamente por falta de este conocimiento global, técnico y regional es que el municipio de Tupiza que se encuentra al sur del país, en las últimas décadas ha atravesado eventos de sequías, granizadas e inundaciones, dejando pérdidas humanas y materiales considerables.

Bajo esta perspectiva se vio necesario la evaluación del desempeño de 19 modelos de circulación general del CMIP6 contrastando con los datos de observación que se tienen dentro la cuenca Tupiza. La manipulación y extracción de la información se realizó a escala mensual considerando solamente la variable de precipitación para el periodo 1943-2014, debido a que la estación Tupiza, la cual se encuentra en la parte baja de la cuenca, cuenta con datos para este periodo de tiempo. Aplicando indicadores estadísticos como el MAE, RMSE, BIAS, CC se identificaron dos modelos climáticos que responden con una similitud aceptable a las condiciones pluviométricas de la zona, estos modelos fueron el modelo CNRM-CM6-1 y el modelo INM-CM4-8.

Palabras clave: Modelos de circulación general, CMIP6, validación, cambio climático.

ABSTRACT

The different general circulation models generated in the sixth phase of the CMIP6 intercomparison of coupled models, which are expected to be published in the sixth IPCC report, are already available for use in the various investigations. It is important to highlight that the uncertainties in the predictions and simulations of the different atmospheric variables are becoming smaller and smaller, in addition to the fact that technology is making it possible to obtain models with higher resolution.

The lack of research in our country on the impacts of climate change on water resources and its integral evaluation with atmospheric variables keep us in a context vulnerable to natural disasters, without giving the necessary importance and anticipation of adaptation and mitigation of climate change.

It is precisely due to the lack of this global, technical and regional knowledge that the municipality of Tupiza, located in the south of the country, has experienced droughts, hailstorms and floods in recent decades, leaving considerable human and material losses.

Under this perspective, it was necessary to evaluate the performance of 19 CMIP6 general circulation models, contrasting them with the observation data available in the Tupiza basin. The manipulation and extraction of the information was performed on a monthly scale considering only the precipitation variable for the period 1943-2014, because the Tupiza station, which is located in the lower part of the basin, has data for this period of time. Applying statistical indicators such as MAE, RMSE, BIAS, CC, two climate models were identified that respond with an acceptable similarity to the pluviometric conditions of the area, these models were the CNRM-CM6-1 and the INM-CM4-8 model.

Key words: General Circulation Models, CMIP6, Validation, Climate Change

INTRODUCCIÓN

En un ámbito global, según resultados de investigaciones realizadas por modelos que relacionan la atmósfera y el océano, se prevé un aumento de temperatura media entre 1°C a 2,5°C además de variaciones de las precipitaciones en un 10% para el año 2100. Estas alteraciones ocasionarían un régimen de eventos extremos entre sequías e inundaciones. (Candela, et al., 2015)

El impacto antropogénico al medio ambiente que empezó en la era industrial ha generado hasta 400ppm de concentración de CO₂ hasta el año 2013 y se espera que alcance entre 600ppm a 850ppm en el año 2100. Las emisiones de gases de efecto invernadero en Bolivia solo alcanzaron el 0.46% de las emisiones mundiales en el año 2005, este porcentaje de concentración proviene principalmente de procesos de deforestación. (BID & CEPAL, 2014)

Vuille & Bradley (2000), mencionan que la temperatura en la cordillera tropical andina se ha incrementado entre 0.1° y 0.11°C por década desde 1939 y el ritmo del calentamiento se está incrementando en estos últimos 25 años entre 0.32° y 0.34°C por década.

Seiler, (2009), basado en el modelo regional climático PRECIS y el coeficiente de variación del modelo ECHAM4, proyectó la precipitación y temperatura en los escenarios A2 y B2 correspondiente al tercer informe de evaluación del IPCC. Según este estudio, es probable que la temperatura media anual incremente en mayor proporción en la zona altiplánica del país. Las precipitaciones tienen un comportamiento variable, por lo cual en algunas zonas se incrementará y en otras disminuirá.

Los modelos de circulación general (GCM) representan los procesos físicos que suceden en la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie de la tierra de manera acoplada, que, mediante simplificaciones y limitaciones, intentan simular numéricamente las dinámicas del sistema climático. Sin embargo, estos modelos no contemplan los fenómenos relacionados a la orografía y convección a escala pequeña o intermedia, esta situación hace necesaria el análisis y comparación de estos modelos con datos observados. (Bonilla & Mesa, 2017)

La sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) es un proyecto que pertenece al Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP) en el cual se desenvuelve el Grupo de Modelado Acoplado (WGCM). CMIP ha alcanzado una mejor comprensión del clima pasado, presente y futuro y la variabilidad en un marco multi-modelo y son los encargados de generar los GCMs.

El diagnóstico, evaluación y caracterización del clima (DECK) es comprendido a partir de esta fase como un sistema base para proporcionar continuidad en las fases pasadas y futuras del CMIP en base a las simulaciones atmosféricas (1979-2014), simulación de control Pre-industrial, evaluación del incremento de las concentraciones de CO₂. Otro componente que constituye la información de entrada a los MIP es la simulación histórica en el periodo 1850-2014. Con estos dos componentes se generan los experimentos de cada fase del CMIP, cada experimento evalúa variables específicas del clima y la atmósfera, estos experimentos están agrupados en los modelos de interoperación MIPs. (Eyring, et al., 2016)

Los impactos del cambio climático sobre los extremos hidrológicos pueden afectar al número de eventos de caudal extraordinario que se producen en un año, a su frecuencia interanual, a la duración y volumen de los hidrogramas y a los caudales punta que se registran. Las condiciones atmosféricas generales en las que se enmarcan la persistencia de las situaciones que generan crecidas son complejas, y resulta difícil establecer una relación directa y unívoca entre clima e inundaciones.

La ciudad de Tupiza se encuentra a las riveras del río que lleva el mismo nombre, en las últimas décadas ha presentado eventos pluviales de gran magnitud ocasionando desde el año 2010 constantes pérdidas de áreas de cultivo por inundaciones, principalmente en las zonas periurbanas y comunidades aledañas. Los últimos 5 años, los eventos han sido aún más extremos y ha generado mayores desastres naturales abarcando ya el área urbana con socavación en los muros de protección ubicados en el río que cruza toda la ciudad, derrumbe de viviendas, caída de puentes peatonales y pérdidas humanas que fueron arrastradas por las diferentes quebradas que circundan a la ciudad.

De acuerdo al estudio a nivel municipal de recurrencia de inundaciones a nivel Bolivia

realizado por el Viceministerio de Defensa Civil, Tupiza es considerado un municipio de nivel de recurrencia "Alto" a inundaciones dentro del departamento de Potosí.

Debido a la situación físico-natural y las condiciones topográficas en la que se encuentra estas zonas, las viviendas que se encuentran emplazados en los límites y alrededor de esta quebrada y el río Tupiza están expuestos a los constantes peligros que ocasionan los desbordes de las quebradas; a causa del mal manejo de las cuencas, y los efectos del cambio climático que cambian los patrones pluviométricos en la zona.

Este trabajo está enfocado en evaluar los modelos climáticos globales de la sexta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP6) considerando

solamente el experimento de simulación histórica que comprende el periodo 1850-2014 con el objetivo de identificar que modelos climáticos globales representan estadísticamente las condiciones pluviométricas de la zona. Para este objetivo es necesario el uso de estaciones de observación en Tierra de la zona de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca Tupiza pertenece a la macrocuenca del río Pilcomayo, abarca una extensión de 2250km², y un perímetro de 284.5km, la pendiente media de la cuenca es de 33% y según los parámetros morfológicos se constituye en una cuenca irregular, cuyas altitudes varían en el rango de 3003msnm a 4486msnm. Según la clasificación Pfafstetter la cuenca se encuentra en el nivel 4 con la siguiente codificación:8694.

En la figura 1 se muestra la delimitación de la cuenca Tupiza y la ubicación de las estaciones meteorológicas. Dentro de la cuenca se encuentran las estaciones de San Miguel de Lipez, Oploca y Salo; de estas tres estaciones, solo se consideró la estación de Oploca por que tiene una buena cantidad de años con datos. La estación Tupiza se encuentra a la salida de la cuenca y almacena 65 años de datos completos.

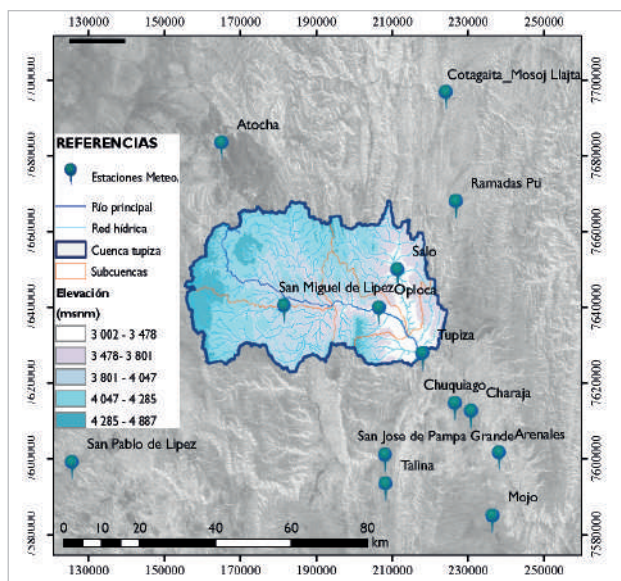


Figura 1. Ubicación espacial cuenca del río Tupiza y estaciones meteorológicas

Se utilizó la información pluviométrica de la base de datos del Sistema de Procesamiento de Datos Meteorológicos (SISMET) perteneciente al SENAMHI. De las 14 estaciones cercanas a la cuenca, las estaciones de Mojo, Tupiza, Oploca, San Pablo de Lipez, San Jose de Pampa Grande, Atocha y Ramadas Pti son las que cuentan con la mayor cantidad de datos, y se encuentran próximas al área de estudio.

Considerando la serie temporal de precipitación total anual de la estación Tupiza, se realizó el análisis de variabilidad climática y cambio climático considerando dos periodos de 30años, de 1960 a 1989 denominado tiempo “pasado” y de 1990 a 2019 denominado tiempo “presente”. En la serie correspondiente al tiempo pasado se tiene una media anual de 343.2mm y para el tiempo presente se tiene una media de 292.7mm, es decir la precipitación total ha disminuido 50.5mm en los últimos 30 años. Para evaluar si la variabilidad climática se ha incrementado o no, se determinó la desviación estándar, el coeficiente de variación, el rango intercuantílico y el rango de la serie de datos

El cambio climático ha sido evaluado mediante un análisis de tendencias. En la figura 2 se puede observar que la tendencia de la serie de precipitación es decreciente, pero para saber si es o no significativa se evaluó mediante las pruebas estadísticas de Mann-Kendall y Spearman.

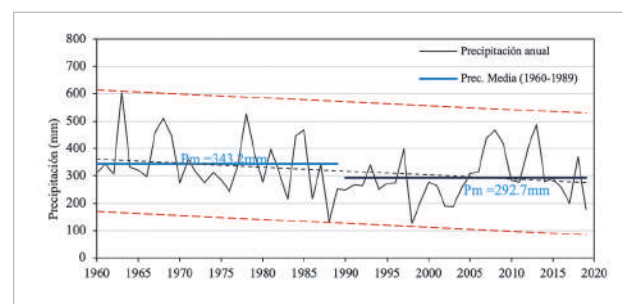


Figura 2. Precipitación total anual estación Tupiza

Los modelos climáticos de circulación general para la CMIP6 usados en este trabajo se descargaron del portal: <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>. De esta fuente de información se obtuvieron los datos de precipitación (“pr”) para las series de simulación histórica (“historical”) que abarca el periodo 1850-2015 a escala mensual para cada uno de los modelos en formato “nc”.

En la tabla 1. se detalla los modelos climáticos usados, la institución a la que pertenecen y el tamaño de resolución.

Tabla 1. Modelos climáticos objeto de validación del CMIP6

Modelo	Institución	Resolución (lat, long)
ACCESS-ESM1-5	CSIRO	1.87° x 1.25°
CAMS-CSM1-0	CAMS	1.25° x 1.12°
CAN-ESM5	CCCMA	2.8° x 2.8°
CANESM5-CANOE	CCCMA	2.8° x 2.8°
CESM2-WACCM	NCAR	1.25° x 0.95°
CMCC-CM2-SR5	CMCC	1.25° x 0.95°
CMCC-ESM2	CMCC	1.25° x 0.95°

CNRM-CM6-1	CNRM-CERFACS	1.4° x 1.4°
CNRM-ESM2-1	CNRM-CERFACS	1.4° x 1.4°
FGOALS-f3-L	CAS	1.25° x 1°
FIO-ESM-2-0	FIO-QLNM	1.25° x 0.95°
HADGEM3-GC31-LL	MOHC	1.87° x 1.25°
INM-CM4-8	INM	2° x 1.5°
INM-CM5-0	INM	2° x 1.5°
IPSL-CM5A2-INCA	IPSL	3.75° x 1.9°
IPSL-CM6A-LR	IPSL	2.5° x 1.25°
IPSL-CM6A-LR-INCA	IPSL	2.5° x 1.25°
MRI-ESM2-0	MRI	1.12° x 1.12°
NESM3	NUIST	1.87° x 1.87°
NorCPM1	NCC	2.5° x 1.9°

Como se puede observar en la tabla 1, el tamaño de resolución de cada modelo varía desde 0.95° a 3.75°, los datos fueron extraídos mediante un script usando la herramienta R Studio, con este script se obtuvo los datos en cada punto donde se ubican las estaciones de observación.

El script utilizado, realizó las siguientes tareas: primeramente, fue necesario modificar y ajustar los límites de extensión en la latitud de los modelos climáticos debido a que originalmente tiene una extensión de 0 a 360°, pero la región geográfica de acuerdo a la configuración WGS84 los límites deben estar entre -180° y 180°. Con el modelo ya corregido se extrae los datos puntuales de cada estación mediante un archivo shapefile. Los datos que extraen de estos modelos se encuentran en unidades de energía ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) por lo cual fue convertido a unidades de mm/mes.

En la figura 3 se presenta el procedimiento mencionado en el párrafo anterior, donde en la imagen de la izquierda está el GCM correspondiente al modelo IPSL-CM6A-LR-INCA, para el cual se extrajo la imagen con la data mensual del año 1850. Ya en la figura de la parte superior derecha se muestra los pixeles que comprenden la cuenca y las estaciones de observación y finalmente en la parte inferior se tienen los datos extraídos del modelo con la estación de observación.

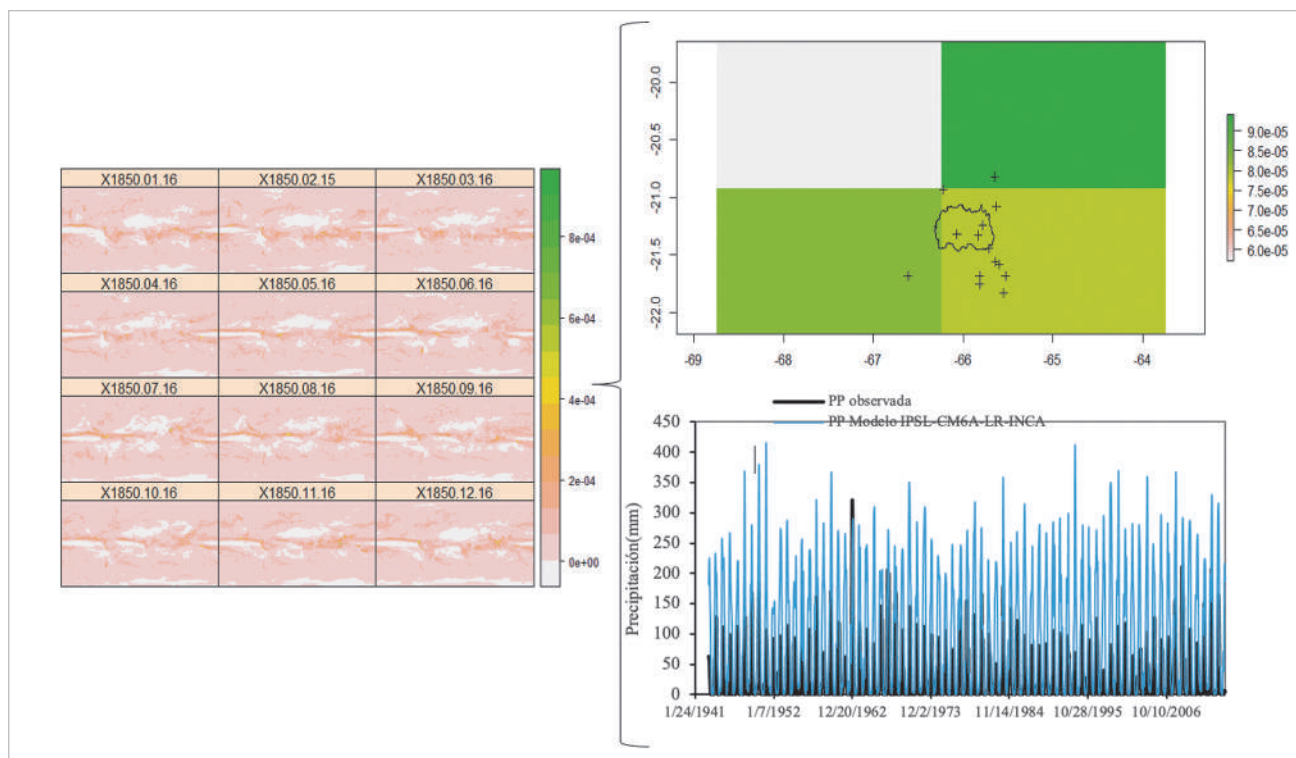


Figura 3. Proceso de extracción de datos del GCM perteneciente al modelo IPSL-CM6A-LR-INCA

Una vez descrito las fuentes de información, los procesos de manipulación y extracción de datos; se realizó las siguientes consideraciones para la evaluación del desempeño de los 19 modelos climáticos.

- El tamaño y área del pixel de cada GCM en la mayoría de los modelos cubre todas las estaciones y la cuenca, por lo tanto, para cada estación de observación, se obtuvieron los mismos valores extraídos del GCM.

- Considerando que las estaciones de Tupiza y Oploca cuentan con registros desde el año 1943 y además se encuentra dentro la cuenca, son las que se consideraron como estaciones representativas de la cuenca ya que según los polígonos de Thiessen, tienen mayor área de influencia.

- Finalmente, las estaciones de Oploca y Tupiza tienen una correlación de 0.87, lo cual muestra una buena relación de patrones pluviométricos entre ambas estaciones, por lo cual se definió trabajar con la estación Tupiza y se rellenó sus datos faltantes con la estación Oploca.

En este estudio, se implementó un conjunto de 5 indicadores estadísticos con los que se evaluó el desempeño de los diferentes modelos en la representación de dichos atributos. (Tabla 2)

Tabla 2. Indicadores estadísticos utilizados para caracterizar atributos del GCM y del clima observado

INDICADOR	ECUACIÓN	VALOR ÓPTIMO
Error medio absoluto(mm)	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i $	0
Raíz del error medio cuadrático (mm)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$	0
Error sistemático, sesgo o BIAS (mm)	$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$	0
Coefficiente de correlación de Pearson	$CC = \frac{cov(P^i, P^o)}{\sigma(P^i) * \sigma(P^o)}$	1
Coefficiente de determinación	r^2	1

La comparación de los resultados de un modelo particular P_i , con las observaciones O_i se apoya en las características centrales de los errores del modelo $P_i - O_i$. Es el caso del error medio absoluto, MAE y de la raíz del error medio cuadrático, RMSE. Para evitar la cancelación de los errores por exceso y defecto la primera usa el valor absoluto y la segunda el cuadrado. La diferencia entre ambas es que los errores más grandes pesan más en la segunda. En ambos casos un modelo es mejor mientras menor sea

el indicador, con valor óptimo 0.

Para tener una idea del sesgo en la predicción, el indicador BIAS considera el promedio de los valores conservando el signo y no puede mirarse aislado de los dos anteriores por causa de la mencionada cancelación. Un valor de cero indica ausencia de sesgo en promedio, no necesariamente ausencia de error. El coeficiente de correlación r , mide el grado de asociación lineal entre la serie observada y simulada por el modelo, está acotada entre -1 y 1, ambos valores indican relación lineal perfecta y 0 indica ausencia de relación lineal. Sin embargo, un buen coeficiente de correlación no significa un buen modelo, porque este indicador no revela la escala ni la tendencia central de cada serie. En otras palabras, este indicador requiere que se mire a los anteriores que sí consideran esas características de las series. De manera semejante, el coeficiente de determinación, r^2 mide la fracción de la varianza de las observaciones explicada por el modelo. (Bonilla & Mesa, 2017)

RESULTADOS

Los principales parámetros estadísticos de la evaluación de la variabilidad climática en la estación Tupiza se muestran en la tabla 3. La desviación estándar reduce para el tiempo presente, pero también se reduce la precipitación media, por lo tanto, es el coeficiente de variación el parámetro que nos relaciona tanto la media como la desviación estándar, este coeficiente tiene un leve incremento para el tiempo presente (1990-2019) de 0.2%; con este resultado se puede concluir que la variabilidad climática en la zona baja de la cuenca donde se ubica la estación Tupiza se ha incrementado levemente en los últimos 30 años.

La serie total de datos desde 1960 a 2019 muestra una tendencia decreciente

significativa según las pruebas de Spearman y Mann Kendall realizadas en la herramienta TREND V1.0.2 concluyendo con este análisis que las precipitaciones debido al cambio climático se han reducido en cuanto a volúmenes totales registrados en la parte baja de la cuenca donde se ubica la estación Tupiza, sin embargo, esto no quiere decir que el riesgo de eventos extremos se haya reducido. (Tabla 4.)

Tabla 3. Parámetros estadísticos para la evaluación de la variabilidad climática en la estación Tupiza

Periodo	Mínimo	Máximo	Media	Rango de la serie	Cuartil 1 (Q1)	Cuartil 3 (Q3)	Rango Inter cuartil	Desviación Estándar	Coficiente de variación
1960-1989	128.8	604.5	343.2	475.7	280.7	392.9	112.2	102.98	30.0
1990-2019	125.9	485.2	292.7	359.3	250.7	332.7	82	88.51	30.2

Tabla 4. Pruebas de tendencia de la serie de precipitación de la estación Tupiza

Test estadístico	Z estadístico	Valores críticos para cada porcentaje de significancia			Resultado
		a=0.1	a=0.05	a=0.01	
Mann-Kendall	-1.984	1.645	1.96	2.576	Significativo
Spearman's Rho	-2.08	1.645	1.96	2.576	Significativo

La evaluación del desempeño de cada uno de los modelos climáticos mediante los indicadores estadísticos, dieron como resultado que los modelos CMCC-CM2-SR5 y CMCC-ESM2 son los que tiene mejor correlación con los datos observados de la estación Tupiza. Sin embargo, estos modelos tienen un 80% de sobre estimación según el coeficiente BIAS y los errores MAE y RMSE alcanzan los 130 y 190mm respectivamente.

Los modelos con menor error y sesgo son el IPSL-CM5A2-INCA y HadGEM3-GC31-LL los cuales varían entre 27 y 32mm de MAE y una sobreestimación aproximada del 40%.

Considerando que los modelos con alto coeficiente de correlación y bajo porcentaje de sobreestimación y error no son los mismos; los modelos que mejor se ajustarían a las características pluviométricas de la zona media y baja de la cuenca Tupiza fueron el CNRM-CM6-1 que tiene un error de 45mm, coeficiente de correlación de 0.7 y

un porcentaje de sobreestimación de los datos mensuales del 60%. Otro de los modelos es el INM-CM4-8 que tiene un error de 42mm, un coeficiente de correlación también de 0.7 y un porcentaje de sobreestimación del 60%.

Graficando a nivel mensual, se pudo observar que el modelo CNRM-CM6-1 tiene un comportamiento similar a los datos observados, excepto en el mes de febrero, en cambio el modelo INM-CM4-8 tiene un comportamiento más parecido con los datos observados y también menos error diferencia de magnitud (Figura 4-derecha.)

Para la serie anual que se muestra en el lado izquierdo de la figura 4.; se puede observar la sobreestimación de los datos en ambos modelos climáticos y el modelo que mejor similitud tiene a los datos anuales observados es el INM-CM4-

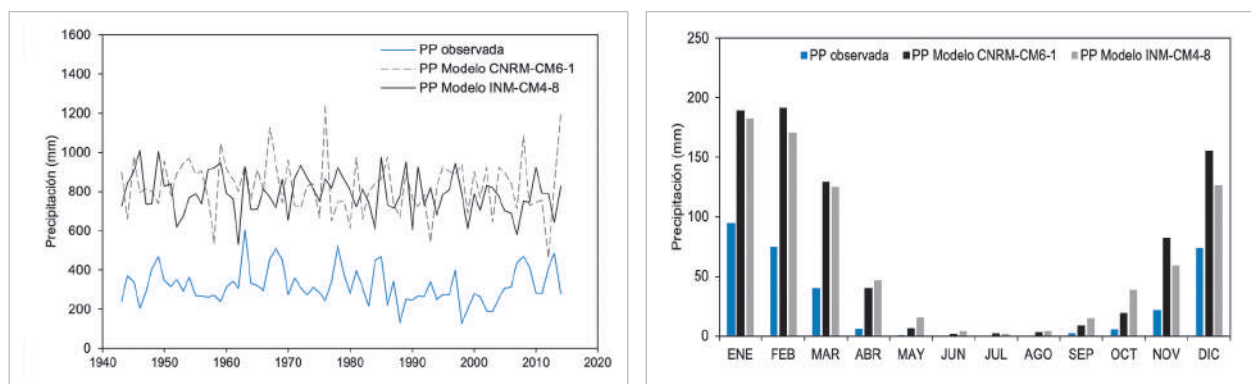


Figura 4. Precipitación anual y media mensual de los modelos climáticos con mejor desempeño.

Tabla 5. Indicadores de desempeño de modelos climáticos del CMIP6

Nro	Modelo	MAE	RMSE	CC	BIAS(%)	r ²
1	ACCESS-ESM1-5	113.64	166.36	0.70	80.92	0.31
2	CESM2-WACCM	71.62	117.99	0.70	72.51	0.39
3	CMCC-CM2-SR5	136.80	196.03	0.73	83.62	0.35
4	CMCC-ESM2	131.51	190.04	0.73	83.08	0.35
5	CNRM-CM6-1	45.46	74.32	0.70	61.40	0.38
6	CNRM-ESM2-1	54.18	89.90	0.68	66.09	0.36
7	Can ESM5	211.92	318.29	0.61	88.79	0.18
8	Can ESM5-CANOE	203.64	303.98	0.64	88.39	0.22
9	fGOALS-F3-L	78.28	110.81	0.70	74.41	0.26
10	FIO-ESM-2-0	117.60	169.69	0.73	81.43	0.36
11	IPSL-CM5A2-INCA	27.21	43.42	0.59	35.89	0.17
12	IPSL-CM6A-LR	69.69	100.04	0.67	71.82	0.21
13	IPSL-CM6A-LR-INCA	72.46	103.01	0.71	72.89	0.29
14	HadGEM3-GC31-LL	32.25	63.54	0.58	41.13	0.30
15	INM-CM4-8	42.35	64.50	0.70	59.46	0.33
16	INM-CM5-0	55.50	90.88	0.71	66.61	0.40
17	MRI-ESM2-0	262.37	319.38	0.53	90.76	-0.58
18	NESM3	114.92	167.19	0.72	81.08	0.35
19	NorCPM1	113.07	143.79	0.69	80.84	0.04

CONCLUSIONES

La variabilidad climática en la cuenca Tupiza se ha incrementado levemente en los últimos 30 años, el cambio climático por otra parte, muestra una tendencia decreciente para la precipitación, esto quiere decir que la disponibilidad hídrica ha disminuido sin embargo los eventos extremos debido al incremento de la variabilidad tienden a ser con mayor intensidad generando tendencias de picos de precipitación más elevados.

Los 19 modelos climáticos evaluados muestran una sobre estimación de los datos respecto a los observados, según otros estudios realizados a una escala mayor, los modelos con una alta correlación también tenían el más bajo MAE y BIAS, sin embargo, en este estudio, los modelos con menos error y sesgo son los que tienen menor correlación en sus datos a escala mensual. Por lo cual los modelos seleccionados como representativos y de mejor desempeño para la cuenca son aquellos con indicadores de correlación igual a 0.7 y sesgo del 60%, no siendo los más óptimos.

La evaluación no contemplo un análisis espacial porque los tamaños de pixel de la mayoría de los modelos climáticos son mucho más grandes que el área de la cuenca por lo tanto no muestra una variación de precipitación en las zonas altas y bajas del área de estudio.

El manejo de los datos climáticos requiere necesariamente el uso de herramientas de análisis de datos o scripts que permitan automatizar los procesos, manipular big data y generar los reportes o gráficos técnicos que muestren de manera clara los resultados de los diferentes procesos.

Se recomienda también evaluar los otros modelos climáticos restantes del CMIP6 para ver si existe algún modelo que represente de mejor manera los patrones de lluvia de la zona, evaluando también para las demás estaciones de observación y sacar un mejor resultado, más representativo para toda la cuenca de estudio, ya que en este trabajo los datos observados corresponden a la zona baja y media de la cuenca Tupiza.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BID & CEPAL, 2014. La economía del cambio climático en el Estado Plurinacional de Bolivia, s.l.: s.n.

Bonilla, C. & Mesa, O., 2017. Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Ciencias de la Tierra*, 41(158), pp. 107-118.

Candela, L. y otros, 2015. Efectos del cambio climático y uso de suelo sobre los recursos hídricos de la cuenca del río Tordera (Barcelona-España). *Aqua-LAC*, Volumen 7, pp. 1-10.

Civil, V. d. D., 2017. Plan de contingencias inundaciones, s.l.: s.n.

Eyring, V. y otros, 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, Volumen 9, pp. 1937-1958.

Seiler, C., 2009. Implementation and validation of a regional climate model for Bolivia. *Fan-Bolivia*.

Vuille, M. & Bradley, R., 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical andes. *Geophysical Research Letters*, 27(23), pp. 3885-3888.



NUESTRA INFRAESTRUCTURA

Edificio de la Facultad de Ingeniería Civil



Facultad de Ingeniería Civil Sub Q'ara Punku



Laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Suelos



Laboratorio de Física



Laboratorio de Química e Ingeniería Sanitaria



Laboratorio de Geotecnia



Laboratorio de Asfaltos



Gabinete de Topografía



Laboratorio de Informática



Biblioteca



Salón de actos



Maestrías



Eventos culturales



Instituto de aguas



Convenio con la Universidad de Gante, Bélgica Proyecto de Investigación “Prevención de la Compactación del Suelo por Operaciones Agrícolas en Chuquisaca”



