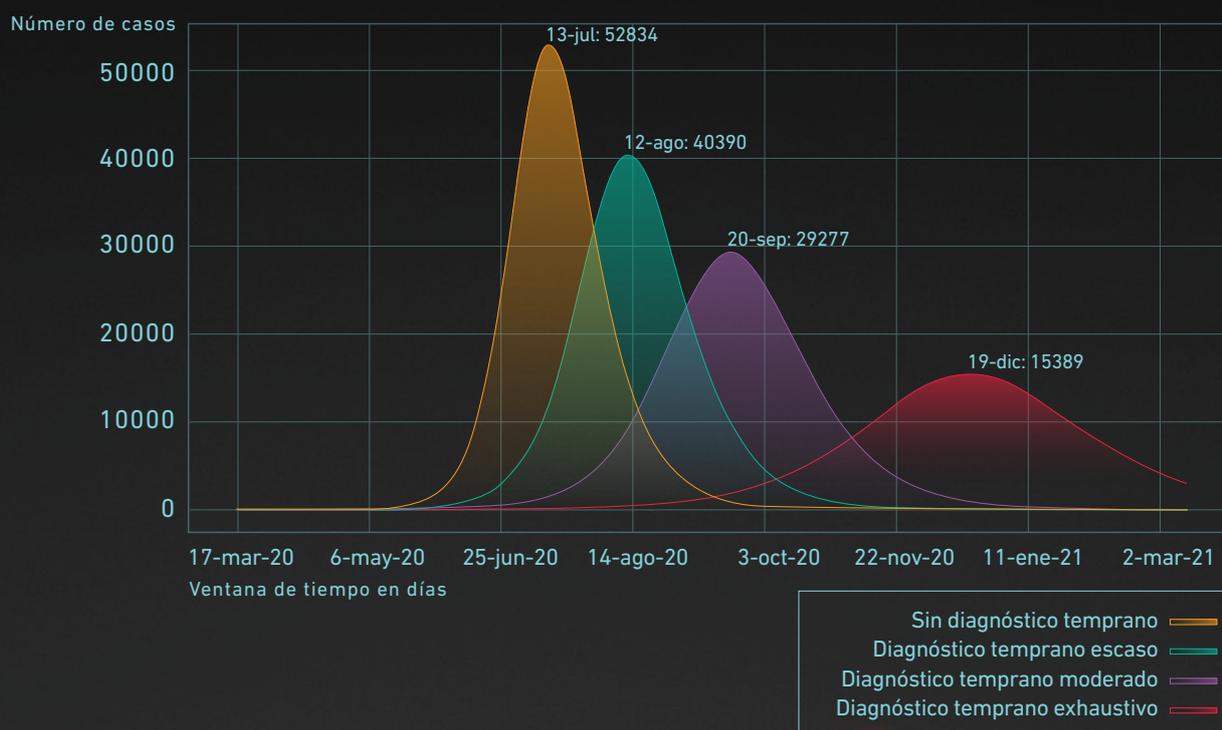




REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990

Volumen 47, No.1, Febrero – Abril 2021



REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990

Volumen 47, No. 1, Febrero – Abril 2021

TEMÁTICA Y ALCANCE

La Revista Politécnica es una publicación periódica trimestral, editada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, cuyo objetivo es contribuir al conocimiento científico y tecnológico, mediante la publicación de estudios científicos relacionados a las áreas de ciencias básicas (Física, Química, Biología y Matemática) e ingenierías (Química y Agroindustria, Civil y Ambiental, Eléctrica y Electrónica, Geología y Petróleos, Mecánica, y Sistemas). La Revista Politécnica está dirigida a profesionales e investigadores que trabajan en estos campos del conocimiento.

EDITOR

Oscar Eduardo Camacho, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
editor.rp@epn.edu.ec

CO-EDITORA

Jenny Gabriela Torres, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
coeditor.rp@epn.edu.ec

CONSEJO EDITORIAL

Ph.D. José Aguilar
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Edinzo Iglesias
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Gabriel Salazar
Organización Latinoamericana de Energía, Ecuador

Ph.D. Santiago Arellano
Chalmers University of Technology, Suecia

Ph.D. Francisco León
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Pablo Samaniego
Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), Francia

Ph.D. Carlos Avila
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Orestes Llanes
Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba

Ph.D. Gustavo Scaglia
Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Ph.D. Leonardo Basile
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Diego Ordoñez
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Hebertt Sira-Ramirez
Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute, México

Ph.D. Silvia Calderón
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Rui Pedro Paiva
University of Coimbra, Portugal

Ph.D. Carlos Smith
University of South Florida, Estados Unidos

Ph.D. Jean François Dulhoste
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. José Luis Paz
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Ph.D. Sebastian Taco
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Dr. Pamela Flores
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Nelson Pérez
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Cristian Vallejo
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Carlos Gallardo
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Franklin Rivas
Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile

Ph.D. Marcos Villacis
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Victor Hugo Hidalgo
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Andrés Rosales
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Cesar Witt
Université des Sciences et Technologies de Lille, Francia

La Revista Politécnica está incluida en Scientific Electronic Library Online (SciELO), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (REDIB), Matriz de Información para el Análisis de Revistas (MIAR), Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CiteFactor, PKP Index, Google Scholar, ResearchBib, International Institute of Organized Research (I2OR), ICI World of Journals.

Se autoriza la reproducción total o parcial de su contenido siempre y cuando se cite la fuente. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores.

Coordinador Técnico Operativo

Ing. Ricardo Villarroel
ricardo.villarroel@epn.edu.ec

Ing. Katherine Aro
katherine.aro@epn.edu.ec

Proofreader

MSc. María Eufemia Torres

Diseño de Portada

Santiago Otalima
Diseñador Gráfico

AUTORIDADES

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**Vicerrectora de Investigación,
Innovación y Vinculación**
Alexandra Alvarado, Ph.D.

Rectora
Florinella Muñoz, Ph.D.

Vicerrector de Docencia
Iván Bernal, Ph.D.

Palabras del Editor

Este volumen da inicio a nuestra actividad en el año 2021. Se presentan seis artículos asociados a diferentes áreas del conocimiento con temas de actualidad y de importancia para el país. Estamos seguros que estos artículos captarán el interés de investigadores, docentes y estudiantes en sus actividades propias. A continuación, se presenta un resumen de cada uno de estos temas.

El primer artículo fue realizado por Castro y colaboradores. En este se presenta el modelo matemático de tipo compartimental con individuos asintomáticos utilizado por el Centro de Modelización Matemática (MODEMAT) para estudiar la propagación del SARS-CoV-2 en Ecuador, así como el esquema variacional de tipo bayesiano desarrollado para estimar los diferentes parámetros del modelo, en presencia de incertidumbre de los datos observados. Esta estimación permite realizar actualizaciones periódicas del número efectivo de reproducción, así como proyecciones a corto plazo, mediante métodos de ensamble de la incidencia de la epidemia.

El segundo manuscrito fue realizado por Quijia-Pillajo y colaboradores. Esta publicación determina los factores que afectan la productividad laboral de las empresas en Ecuador, incorporando factores externos a la empresa como las economías de aglomeración. Utilizando la información a nivel de empresas de la encuesta de ciencia, tecnología e innovación de los años 2011 y 2014, se emplea un modelo de regresión múltiple y se estima la productividad a través del método de mínimos cuadrados ordinarios. Los resultados indican que un aumento de un punto porcentual de la proporción de trabajadores con educación terciaria aumenta la productividad laboral en 1%. Si las empresas exportan o se adhieren a un grupo empresarial, su productividad laboral aumentaría en 41% y 27,7%, respectivamente. Otros factores que aumentan la productividad son el estatus multiplanta y la inversión de capital fijo. Además de los factores individuales, los factores externos como la densidad de empresas y la competencia en un sector y región dados pueden incentivar la productividad individual de las empresas.

El tercer trabajo fue elaborado por Medina-Sánchez y Naranjo-Cevallos. El artículo presenta el diseño de un controlador predictivo (MPC) aplicado a un convertidor reductor de corriente continua. En un principio se muestra el análisis matemático del convertidor reductor y se obtiene su modelo matemático lineal y no lineal, considerando los modos de conducción continua y discontinua del convertidor. Se presenta la metodología para diseñar el controlador predictivo basado en el método de matriz dinámica de control, y para disminuir la carga computacional, se optimiza analíticamente la función de costo del controlador predictivo. Para contrastar los beneficios del control MPC, se propone el diseño de un controlador convencional proporcional, integral y derivativo (PID). Mediante simulación, se evalúa la respuesta transitoria temporal del sistema no lineal de la planta bajo los controladores MPC y PID. Se concluye que la respuesta de la planta con el controlador MPC presenta una respuesta transitoria aceptable y sin error en estado estacionario. Finalmente, se comparan las bondades de cada uno de los dos controladores diseñados.

El cuarto artículo fue escrito por Sotalín, y colaboradores. En esta investigación se analiza la influencia de los parámetros operativos de un horno túnel para cerámica de una industria ecuatoriana, en la emisión de gases a la atmósfera. El diagnóstico inicial consistió en la medición de los parámetros de temperatura, presión interna, concentración de oxígeno y consumo de combustible del horno túnel, posteriormente se realizaron los balances de masa y energía y a continuación se determinó la relación combustible-aire teórico por galón de diésel. Se identificó que el flujo másico de aire de ingreso al horno (5,83 kg/s) fue menor que el de salida (9,89 kg/s) y que la relación combustible-aire fue de 1 200 ft³ de aire por galón de diésel. Considerando un exceso de aire del 20 % se reguló el flujo de aire que ingresa a los quemadores y se determinaron las condiciones óptimas para la combustión. Bajo los nuevos parámetros establecidos, se evidenció una reducción del 22 % en la concentración de monóxido de carbono (CO) y del 1,5 % en la concentración de oxígeno (O₂) presente en la chimenea, sin embargo, los valores alcanzados aun no cumplen con la normativa ambiental del país. Se concluyó que la inducción del aire exterior, fuente abierta,

y la relación combustible-aire son los parámetros operativos que más influencia tienen en las emisiones del horno túnel para materiales cerámicos. Además, que el control sistemático de la concentración de oxígeno, mediante la calibración de los quemadores, permite reducir en un 22 % las emisiones de monóxido de carbono y en 1.5 % la concentración de oxígeno, sin afectar la calidad del producto.

La quinta investigación fue elaborada por Chacón, y colaboradores. Este artículo presenta la evaluación del edificio del antiguo Colegio Simón Bolívar y varias técnicas de reforzamiento en el sistema de muros portantes de esta estructura patrimonial de adobe con irregularidad en planta, que está ubicada en el casco colonial de la ciudad de Quito. Este estudio supone que las fuerzas externas actúan en dirección del plano más resistente de la pared y que los muros de adobe tienen poca capacidad de resistir cargas laterales fuera del plano. Basado en estas condiciones, un análisis de sensibilidad de la discretización para elementos finitos se presenta mediante el uso de un programa comercial y se determinan valores empíricos que relacionan la proporción entre las dimensiones de los elementos finitos y la longitud principal de los muros. Por lo tanto, esta propuesta para el mallado de los elementos finitos busca obtener proporciones iniciales para hacer un primer análisis de calibración de los elementos mediante el control de esfuerzos y desplazamientos. El presente trabajo evalúa el mallado de elementos finitos comúnmente utilizado para el análisis de estructuras bidimensionales por lo que se destaca la importancia de la calibración inicial del mallado de elementos para obtener resultados confiables.

El sexto artículo fue escrito por Gabriela Izurieta. Este artículo examina el impacto de la transferencia de efectivo de BDH en las habilidades cognitivas y no cognitivas para los estudiantes que desean ingresar a una institución de educación superior. Se utiliza el puntaje del examen Ser Bachiller y la información sobre expectativas, motivación y la autoestima de los estudiantes en la Encuesta de Factores Asociados para el ciclo académico 2016-2017. Se evaluó la exposición a corto plazo al programa construyendo un índice de pseudo-asignación (pseudo índice RS) y un diseño de regresión discontinua. Los resultados muestran que los hogares que están cerca del puntaje de asignación del bono (28.2) tienen una mayor probabilidad de participar en el programa que varía de 7.1 a 7.9 puntos porcentuales. Para las habilidades cognitivas, las estimaciones con variables instrumentales revelan que la transferencia tiene un efecto negativo y estadísticamente significativo en el puntaje de matemáticas que varía de 0,35 a 0,43 puntos porcentuales. Con respecto a los resultados no cognitivos, el BDH tiene un impacto negativo en la autoestima académica de los estudiantes, tanto en matemáticas (varía de 0.25 a 0.28 puntos porcentuales), un efecto similar en lenguaje y un impacto estadísticamente significativo y negativo en la expectativa de obtener un título de cuarto nivel de 0.21 puntos porcentuales.

Queremos informar que como parte de la colección de revistas Scielo-Ecuador nos sentimos muy complacidos de que se han alcanzado los estándares de calidad exigidos para recibir la certificación de la red Scielo con lo cual desde ahora nuestros artículos serán indexados en el portal scielo.org/es. En parte, este logro se debe a la calidad de los trabajos de nuestros autores; al desprendido apoyo e invaluable comentarios para mejorar los artículos por parte de los revisores, y a la mística de trabajo y sentido de pertenencia por parte de todo el equipo de la Revista Politécnica.

Finalmente, en este volumen queremos informar a nuestros lectores que la Revista Politécnica ha renovado su imagen gracias al apoyo de CEDIA. Esta nueva imagen está asociada a las tendencias actuales, manteniendo los estándares de calidad con el objetivo de alcanzar nuevas metas y seguir siendo un referente para la divulgación científica.

Oscar Eduardo Camacho Quintero, Ph.D.

EDITOR

Contenido
Vol. 47, No. 1
Febrero – Abril 2021

7

Castro, Paula; De los Reyes, Juan Carlos; González-Andrade, Sergio; Merino, Pedro
Estimación de Parámetros para un Modelo del SARS-CoV-2 en Ecuador en Presencia de Incertidumbre

Parameter Estimation for SARS-CoV-2 Model in Ecuador in Presence of Uncertainty

17

Quijia-Pillajo, Jonathan; Guevara-Rosero, Carolina; Ramírez-Álvarez, José
Determinantes de la Productividad Laboral para las Empresas Ecuatorianas en el Periodo 2009-2014

Determinants of Labor Productivity for Ecuadorian Companies in the Period 2009-2014

27

Medina-Sánchez, Martín; Naranjo-Cevallos, Marjorie
Diseño de un Controlador Predictivo Aplicado a un Convertidor Reductor de Corriente Continua

Design of a Predictive Controller Applied to a Direct Current Buck Converter

35

Sotalín, Daniel; Montenegro, Lucía; Cabrera, Marcelo

**Estudio de la Influencia de los Parámetros Operativos sobre las Emisiones de un Horno
Túnel para Materiales Cerámicos**

*Study of the Influence of the Operational Parameters on the Emissions of a Tunnel Kiln for
Ceramic Materials*

43

Chacón, Juan; Suquillo, Betzabeth; Sosa, Diego; Celi, Carlos

**Evaluación y Reforzamiento de una Estructura Patrimonial de Adobe con Irregularidad
en Planta**

Evaluation and Reinforcement of an Adobe Heritage Structure with Plan Irregularities

57

Izurieta, Gabriela

**Conditional Cash Transfers and Cognitive, Non-Cognitive Outcomes: The Case of the
Bono de Desarrollo Humano in Ecuador**

*Transferencias Monetarias Condicionadas y Habilidades Cognitivas y No Cognitivas: El Caso
del Bono de Desarrollo Humano en Ecuador*

Estimación de Parámetros para un Modelo del SARS-CoV-2 en Ecuador en Presencia de Incertidumbre

Castro, Paula^{1,*}  ; De los Reyes, Juan Carlos¹  ; González-Andrade, Sergio¹  ; Merino, Pedro¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Centro de Modelización Matemática en Áreas Clave para el Desarrollo, Quito, Ecuador

Resumen: En este artículo presentamos el modelo matemático de tipo compartimental con individuos asintomáticos utilizado por el Centro de Modelización Matemática (MODEMAT) para estudiar la propagación del SARS-CoV-2 en Ecuador, así como el esquema variacional de tipo bayesiano desarrollado para estimar los diferentes parámetros del modelo, en presencia de incertidumbre de los datos observados. Esta estimación permite realizar actualizaciones periódicas del número efectivo de reproducción, así como proyecciones a corto plazo, mediante métodos de ensamble de la incidencia de la epidemia.

Palabras claves: Estimación de parámetros, SARS-CoV-2, Problemas inversos, Asimilación de datos, Enfoque bayesiano.

Parameter Estimation for SARS-CoV-2 Model in Ecuador in Presence of Uncertainty

Abstract: In this article we present the mathematical compartmental SARS-CoV-2 model, with asymptomatic patients, used by the Research Center on Mathematical Modelling (MODEMAT) to study the spread of the virus in Ecuador, as well as the developed Bayesian variational approach to estimate the model parameters, under uncertainty of the observed data. Thanks to this framework, we are able to estimate periodically the effective reproduction number and carry out short-term forecasts, using an ensemble method, of the incidence of the epidemic.

Keywords: Parameter estimation, SARS-CoV-2, Inverse problems, Data assimilation, Bayesian approach

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos principales del Centro de Modelización Matemática (MODEMAT), en el contexto de la pandemia del coronavirus, consiste en monitorear, a través del uso de modelos matemáticos, la expansión del virus SARS-CoV-2, y los casos de la enfermedad COVID-19 provocada por este patógeno en Ecuador. Para esto, utilizamos un modelo epidemiológico compartimental que incluye en su dinámica a los individuos infecciosos asintomáticos (ver detalles en Li et al (2020); Wu et al (2020); Verity et al (2020)), y estimamos periódicamente los diferentes parámetros del mismo, así como el número de reproducción efectivo de la epidemia.

La principal fuente de información para realizar dichas estimaciones son las estadísticas oficiales de casos confirmados reportados por el *Ministerio de Salud Pública de Ecuador*, las mismas que presentan un alto grado de incertidumbre, no sólo por el margen de error de las pruebas de laboratorio o la limitación de la cantidad de tests que se realizan, sino principalmente por los constantes cambios metodológicos (no siempre coordinados)

que han implementado los diversos organismos oficiales para la recolección y el reporte de los casos.

En un escenario simplificado, el proceso de estimación de parámetros se realiza mediante técnicas de ajuste, las cuales consisten en construir una función matemática que se ajusta mejor a una serie particular de datos. En este contexto, el mejor ajuste implica que la distancia entre la curva y los datos, ubicados como puntos en un espacio predeterminado, debe ser minimizada, alcanzando un óptimo aproximado.

De manera general, la técnica de mínimos cuadrados no lineales consiste en identificar los parámetros que minimizan la suma de las diferencias al cuadrado entre los datos observados y el modelo no lineal utilizado. Así, supongamos que los parámetros identificados están dados por $\Theta := (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ y los datos observados por (y_1, y_2, \dots, y_n) , los cuales representan una serie de tiempo en los pasos temporales t_i en los cuales se realizaron las observaciones. Además, supongamos que la solución del modelo está dada por una función no lineal genérica $f(t_i, \Theta)$. El problema, a grandes rasgos, consiste entonces en hallar el conjunto de parámetros $\hat{\Theta}$ dado por:

*paula.castro@epn.edu.ec

Recibido: 28/08/2020

Aceptado: 06/01/2021

Publicado: 28/02/2021

10.33333/tp.vol47n1.01

CC BY 4.0

$$\hat{\Theta} := \arg \min \sum_{i=1}^n (f(t_i, \Theta) - y_i)^2,$$

donde n es el número de datos disponibles para hacer la inferencia. Hallada la solución de este problema, podemos considerar que la solución $f(t_i, \hat{\Theta})$ brinda el modelo mejor ajustado a la serie temporal t_i , de acuerdo al criterio de mínimos cuadrados (ver, por ejemplo, Chowell (2007)).

Sin embargo, una característica central en la modelización de epidemias y transmisión de enfermedades es que éstos son procesos que obedecen a una cierta dinámica epidemiológica de propagación. El contagio de una persona susceptible se entiende como un encuentro aleatorio con una persona infecciosa, sujeto a varias contingencias, como por ejemplo, la duración o la intensidad de dicho encuentro. De igual manera, las personas ya contagiadas pasan por un periodo de incubación del virus, para luego formar parte de los compartimentos de individuos infecciosos. Todo esto se modeliza a través de un sistema de ecuaciones diferenciales, que debe ser tomado en cuenta a la hora de ajustar datos observados. Así, la principal debilidad del esquema de ajuste de curvas descrito anteriormente es que no necesariamente toma en cuenta dicha dinámica de manera explícita.

Más aún, un proceso de ajuste de mínimos cuadrados de los datos observados puede resultar inadecuado en presencia de incertidumbre en las observaciones. Como se mencionó previamente, en el caso ecuatoriano dicha incertidumbre es sumamente alta en comparación con las estadísticas recogidas por agencias gubernamentales de otros países. Consecuentemente, un proceso de ajuste y estimación de parámetros en el caso ecuatoriano debe tomar en cuenta la incertidumbre como un elemento constitutivo del problema a resolverse.

En ese sentido, la propuesta que presentamos en este artículo consiste en considerar a los parámetros y la solución del modelo epidemiológico del SARS-CoV-2 como variables aleatorias con una cierta distribución de probabilidad y no como valores constantes. Con este cambio en la hipótesis de trabajo, podemos adoptar el paradigma Bayesiano para problemas inversos y estimar los parámetros de manera robusta, buscando minimizar la probabilidad condicional *a-posteriori* de los parámetros, dadas las observaciones.

2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS EN PRESENCIA DE INCERTIDUMBRE

Como mencionamos previamente, una de las principales limitantes de los métodos de ajuste es que no consideran en su construcción la incertidumbre en los datos a ser ajustados, lo cual puede tener efectos importantes en situaciones como la que se presenta actualmente en Ecuador, en relación a la evolución de la COVID-19. Para abordar tal dificultad, optamos por el paradigma bayesiano, con el cual podemos estudiar el problema de estimación de parámetros considerando su carácter intrínsecamente aleatorio.

2.1 Estimador de probabilidad máxima a posteriori

En la inferencia bayesiana, a diferencia de la estimación de máxima verosimilitud, se supone que los parámetros (coeficientes, condición inicial, etc.) son una variable aleatoria x con realizaciones en el espacio multivariable \mathbb{R}^m , de la cual conocemos, *a priori*, su función de densidad de probabilidad $p(x)$. Además, se asume que conocemos la función de densidad de probabilidad condicional (c.p.d.f. por sus siglas en inglés) de las observaciones y , considerando un conjunto de parámetros x dado. A esta función de densidad de probabilidad la denotamos por $p(y|x)$.

La idea básica de este enfoque consiste en combinar la información de las dos funciones de densidad de probabilidad descritas, utilizando la fórmula de Bayes, con el objetivo de obtener una probabilidad *a posteriori* de los eventos. En este caso, se supone que tanto las observaciones, como la información de fondo (estimaciones previas de los parámetros), tienen errores distribuidos normalmente con matrices de covarianza \mathbf{R} y \mathbf{B} , respectivamente. Por lo tanto, la función de densidad de probabilidad condicional de las observaciones viene dada por:

$$p(y|x) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\mathbf{R}|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (y - \mathcal{H}(x))^T \mathbf{R}^{-1} (y - \mathcal{H}(x)) \right\}, \quad (1)$$

y la función de densidad de probabilidad de los parámetros por:

$$p(x) = \frac{1}{(2\pi)^{m/2} |\mathbf{B}|^{1/2}} \exp \left(-\frac{1}{2} (x - x^b)^T \mathbf{B}^{-1} (x - x^b) \right), \quad (2)$$

donde n es el número de datos disponibles para hacer la inferencia, m es el número de parámetros a estimar, x^b representa el conocimiento *a priori* o histórico que se tiene del fenómeno, y $\mathcal{H}(x)$ es un operador que liga las características del fenómeno, en particular los parámetros del modelo, con las observaciones obtenidas del mismo. En general, este es un operador no lineal, el cual está relacionado con el fenómeno observado.

Usando el Teorema de Bayes se obtiene que la distribución de probabilidad *a posteriori* de un evento x , tomando en cuenta las observaciones y , está dada por:

$$p(x|y) = \frac{p(y|x)p(x)}{p(y)}. \quad (3)$$

Ahora, dado que nuestro objetivo es hallar el mejor “estimador Bayesiano” utilizando la aproximación del máximo a posteriori, se busca maximizar la distribución de probabilidad *a posteriori* dada por (3). Puesto que $p(y)$ es la distribución de probabilidad marginal y no depende de x , obtenemos el siguiente problema de optimización a resolverse:

$$\max_x p(y|x)p(x). \quad (4)$$

Aprovechando el hecho de que la función logarítmica $\mathbb{R} \ni t \mapsto \ln(t)$ es monótonamente creciente y continua, se tiene que la solución del problema (4) es equivalente a maximizar el logaritmo

natural de la función objetivo de este problema. Esto es, resolvemos el problema

$$\max_x \ln(p(y|x)) + \ln(p(x)).$$

Finalmente, utilizando las funciones de densidad de probabilidad (1) y (2), obtenemos el problema de minimización equivalente

$$\min_x \frac{1}{2}(y - \mathcal{H}(x))^T \mathbf{R}^{-1}(y - \mathcal{H}(x)) + \frac{1}{2}(x - x^b)^T \mathbf{B}^{-1}(x - x^b), \quad (5)$$

el cual constituye un balance robusto entre la información de fondo y los datos observados.

Las matrices \mathbf{B} y \mathbf{R} corresponden a las matrices de covarianza de los errores de fondo y de las observaciones, respectivamente. Las matrices de covarianza de los errores se utilizan para describir el impacto de los errores que se acumulan en el proceso de recolección de información. De forma más precisa, la matriz \mathbf{R} de covarianza de errores de observación describe la desviación de los eventos observados de los eventos esperados. En palabras simples, esta matriz mide la validez de las mediciones frente a la evolución del fenómeno. La matriz \mathbf{B} , por otro lado, describe la diferencia entre la estimación previa de los parámetros y los parámetros “verdaderos” del fenómeno. En el caso de la evolución de la COVID-19, esta matriz describe cuán confiable es el conocimiento que se tiene acerca de los parámetros de propagación del virus en el momento de iniciar el proceso de estimación.

El problema de optimización (5) guarda estrecha relación con la estimación de máxima verosimilitud de los parámetros del sistema, obtenida a través de *filtros de Kalman* clásicos. En ambos casos, las observaciones son consideradas en un solo instante de tiempo, las cuales son corregidas a través de lo que se conoce como interpolación óptima o, equivalentemente, la resolución del problema variacional (5).

2.2 Esquema variacional en el tiempo

En los casos en que las observaciones son tomadas en distintos instantes del tiempo, el esquema bayesiano descrito anteriormente necesita ser adaptado para dar cuenta de la evolución de un sistema, así como de la variación de la incertidumbre. Este tipo de problemas ha sido abordado desde los dos enfoques comentados previamente: filtros de Kalman y métodos variacionales (ver, por ejemplo, Asch et al (2016)). En el primero de ellos, se adapta la construcción del filtro a un problema que varía en el tiempo, obteniéndose los denominados *filtros de Kalman extendidos*, los cuales requieren la solución de las ecuaciones diferenciales de Riccati. En el caso variacional, en cambio, el problema es formulado como uno de *control óptimo* y su solución requiere generalmente del *método adjunto*.

En nuestro caso, el problema de propagación del SARS-CoV-2 está asociado a la solución del sistema de ecuaciones diferenciales que determinan la evolución de los compartimentos poblacionales

utilizados en el modelo. En tal razón, consideramos, de manera general, un sistema de ecuaciones diferenciales del tipo

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathcal{M}(\mathbf{u}, \mathbf{x}, t),$$

donde \mathcal{M} es un operador que determina la dinámica del proceso. Además, suponemos que las observaciones están dadas por

$$\mathbf{y} = \mathcal{H}(\mathbf{u}, t) + \epsilon,$$

donde \mathcal{H} es un operador de observación, que depende del estado \mathbf{u} y del tiempo t . Los datos medidos se expresan entonces como el estado observado más errores de observación, dados por ϵ .

La idea central detrás del proceso de estimación de parámetros dinámico es buscar un balance entre el conocimiento a priori que se tiene del fenómeno, lo que se conoce como el estado histórico o *background*, y el estado que ha sido observado o medido en el terreno. En el caso de los parámetros en la predicción de la evolución de la COVID-19 en el Ecuador, el estado histórico queda determinado por el conocimiento que se tiene del virus y su comportamiento, algo que ha sido bien establecido en estudios desarrollados, por ejemplo, en Li et al (2020). Por otro lado, el estado medido estaría dado por los resultados arrojados por la cifras nacionales que se obtienen por la toma de muestras, cifras de defunción, etc.

Extendiendo el problema (5), se busca entonces resolver el problema variacional

$$\begin{aligned} \min_x \quad & \frac{1}{2} \int_0^T (y(t) - \mathcal{H}(\mathbf{u}, t))^T \mathbf{R}_t^{-1} (y(t) - \mathcal{H}(\mathbf{u}, t)) d\mu \\ & + \frac{1}{2} (x - x^b)^T \mathbf{B}^{-1} (x - x^b), \\ \text{s.t.} \quad & \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathcal{M}(\mathbf{u}, \mathbf{x}, t), \end{aligned} \quad (6)$$

donde μ puede corresponder a la medida de Lebesgue en caso de considerar observaciones continuas o a la medida de conteo en caso de que las mediciones se obtengan en instantes puntuales del tiempo. Si, adicionalmente, el conjunto de parámetros consiste por una parte, en los coeficientes del modelo y por otra, en la condición inicial del mismo, el segundo término del funcional se puede dividir a su vez en dos, dando lugar al problema variacional

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}_0, \Theta} \quad & \frac{1}{2} \int_0^T (y(t) - \mathcal{H}(\mathbf{u}, t))^T \mathbf{R}_t^{-1} (y(t) - \mathcal{H}(\mathbf{u}, t)) d\mu \\ & + \frac{1}{2} (\Theta - \Theta^b)^T \mathbf{B}_\Theta^{-1} (\Theta - \Theta^b) \\ & + \frac{1}{2} (\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_0^b)^T (\mathbf{P}_0^b)^{-1} (\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_0^b), \\ \text{s.t.} \quad & \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathcal{M}(\mathbf{u}, \mathbf{u}_0, \Theta, t), \end{aligned} \quad (7)$$

en el cual la matriz \mathbf{B}_Θ corresponde a la covarianza de errores de fondo de los coeficientes del modelo y \mathbf{P}_0^b a la covarianza de errores de fondo de la condición inicial, respectivamente.

Dado que los operadores \mathcal{M} y \mathcal{H} son operadores diferenciales continuos y no lineales, se introducen comúnmente, aproximaciones discretas de los mismos, dadas por matrices \mathbf{M} y \mathbf{H} , respectivamente. Este proceso de aproximación se realiza, por ejemplo, con la aplicación de métodos de resolución numérica como el método de Euler implícito para la variable temporal y el método de Newton para la variable espacial. Dada esta aproximación en un intervalo temporal, del cual tomamos una sucesión de instantes t_k , con $k = 0, 1, \dots$, se tiene una aproximación de la dinámica del fenómeno dada por:

$$\mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{M}_{k+1}(\mathbf{u}_k, \mathbf{x}_k), \quad (8)$$

donde suponemos que no hay errores en el modelo. De la misma forma, consideramos que las observaciones están dadas por:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{u}_k + \epsilon_k. \quad (9)$$

Suponemos que en el instante inicial $k = 0$ conocemos el estado histórico \mathbf{u}_0^b y su matriz de covarianza \mathbf{P}_0^b . Además, suponemos que los errores son no correlacionados con las observaciones en (9). Así, sabemos que una condición inicial \mathbf{u}_0 define una solución única del modelo \mathbf{x}_{k+1} según (8). Con estos antecedentes, el problema variacional discretizado es el siguiente:

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{1}{2} \sum_{k=0}^T (\mathbf{H}_k \mathbf{u}_k - \mathbf{y}_k)^\top \mathbf{R}_k^{-1} (\mathbf{H}_k \mathbf{u}_k - \mathbf{y}_k) \\ & + \frac{1}{2} (\Theta - \Theta^b)^\top \mathbf{B}_\Theta^{-1} (\Theta - \Theta^b) \\ & + \frac{1}{2} (\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_0^b)^\top (\mathbf{P}_0^b)^{-1} (\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_0^b), \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{M}_{k+1}(\mathbf{u}_k, \mathbf{x}_k) \quad k = 0, 1, \dots \end{aligned} \quad (10)$$

La solución de este problema consiste en el conjunto de parámetros del modelo que maximizan la probabilidad a posteriori, a partir de lo cual es posible hacer una estimación robusta de la evolución del fenómeno. En este problema, nótese que se consideran las observaciones en todo el período temporal para la correcta estimación de los parámetros.

Un elemento esencial en (10) son las matrices de covarianza de errores. Mientras que \mathbf{R} puede construirse a partir de los errores de instrumentación y la cantidad de mediciones realizadas y \mathbf{B}_Θ puede incorporar varianzas de parámetros previamente estudiadas, la matriz \mathbf{P}_0^b requiere de un tratamiento distinto. Esta matriz cuantifica de cierta manera la sensibilidad del problema con respecto a las condiciones iniciales, con lo cual se vuelve un elemento esencial para realizar pronósticos en modelos no lineales.

Una de las técnicas más utilizadas para actualizar la matriz \mathbf{P}_0^b consiste en reemplazarla por una matriz construida a partir de un conjunto de ensamble, obtenido en base a perturbaciones aleatorias realizadas en los parámetros del modelo en cuestión y las correspondientes simulaciones en un horizonte temporal que permita capturar la dinámica del modelo.

3. PROBLEMA INVERSO PARA EL SARS-COV-2

Uno de los mayores retos en el caso del SARS-CoV-2 es que muchas de las personas infectadas no presentan ningún síntoma, o desarrollan síntomas leves que pueden pasar desapercibidos. Esto hace que exista una importante fracción de la población infectada que no aparece en los registros y que son responsables de una gran cantidad de contagios, lo cual provoca a su vez que la modelización matemática de la propagación del virus y de la COVID-19 sea más compleja. Además, plantea retos a las autoridades sanitarias sobre el diseño eficiente y efectivo de cercos epidemiológicos y, sobre todo, diseño de campañas para la realización de pruebas tempranas a casos sospechosos, para su oportuno aislamiento.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) sostiene que la mayoría de las personas (alrededor del 80%) se recupera de la enfermedad sin necesidad de realizar ningún tratamiento especial; alrededor de 1 de cada 6 personas que contraen la COVID-19 desarrolla una enfermedad grave; y, las personas mayores o las que padecen afecciones médicas subyacentes tienen más probabilidades de desarrollar una enfermedad grave. En torno al 2% de las personas que han contraído la enfermedad han muerto.

La familia de modelos matemáticos más usada para estudiar la proliferación de enfermedades virales son los modelos SEIR (por las siglas de *Susceptibles, Expuestos, Infectados y Removidos*). En estos modelos se crean compartimentos y se analizan las transiciones desde población susceptible a expuesta, la cual luego de un tiempo pasa a infecciosa, y de ésta, a removida. La remoción de los individuos se lleva a cabo mediante el aislamiento del resto de la población (cuarentena), la inmunización contra la infección (vacunación), la recuperación de la enfermedad con inmunidad total contra la reinfección o la muerte causada por la enfermedad (ver Brauer & Castillo-Chávez (2001)).

Para estudiar matemáticamente las particularidades del SARS-CoV-2, la variable personas infecciosas, en el modelo descrito anteriormente, se debe subdividir en dos compartimentos: personas infecciosas documentadas y no-documentadas. Así, los compartimentos poblacionales resultantes son: población susceptible, expuesta, infecciosa documentada, infecciosa no-documentada y removida. Estos compartimentos se acoplan entre sí mediante un sistema de ecuaciones diferenciales, que describe los flujos entre uno y otro, y que depende fuertemente de dos coeficientes dominantes: el índice de contagio (asociado al distanciamiento social) y la diseminación del virus por parte de los infecciosos no-documentados. Además, se incorpora información de movilidad humana entre ciudades o provincias, obteniéndose el siguiente sistema:

$$\frac{dS_i}{dt} = -\frac{\beta_i S_i I_i^r}{N_i} - \frac{\mu_i \beta_i S_i I_i^u}{N_i} + \theta \sum_j \frac{M_{ij} S_j}{N_j - I_j^r} - \theta \sum_j \frac{M_{ji} S_i}{N_i - I_i^r} \quad (11a)$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{\beta_i S_i I_i^r}{N_i} + \frac{\mu_i \beta_i S_i I_i^u}{N_i} - \frac{E_i}{Z} + \theta \sum_j \frac{M_{ij} E_j}{N_j - I_j^r} - \theta \sum_j \frac{M_{ji} E_i}{N_i - I_i^r} \quad (11b)$$

$$\frac{dI_i^r}{dt} = \alpha \frac{E_i}{Z} - \frac{I_i^r}{D} \quad (11c)$$

$$\frac{dI_i^u}{dt} = (1 - \alpha) \frac{E_i}{Z} - \frac{I_i^u}{D} + \theta \sum_j \frac{M_{ij} I_j^u}{N_j - I_j^u} - \theta \sum_j \frac{M_{ji} I_i^u}{N_i - I_i^u} \quad (11d)$$

$$\frac{dR_i}{dt} = \rho \frac{I_i^r + I_i^u}{D} \quad (11e)$$

$$N_i = N_i + \theta \sum_j M_{ij} - \theta \sum_j M_{ji}. \quad (11f)$$

Aquí, S_i , E_i , I_i^r , I_i^u , R_i son las soluciones del sistema de ecuaciones diferenciales (11) y representan a la población susceptible, expuesta, infecciosa documentada, infecciosa no documentada y removida, mientras que N_i representa la población total de la ciudad i . El sistema se complementa con condiciones iniciales para cada una de las variables del mismo. Las soluciones mencionadas son halladas mediante la aplicación de métodos de resolución numérica como el método de Euler implícito para la variable temporal y el método de Newton para la variable espacial.

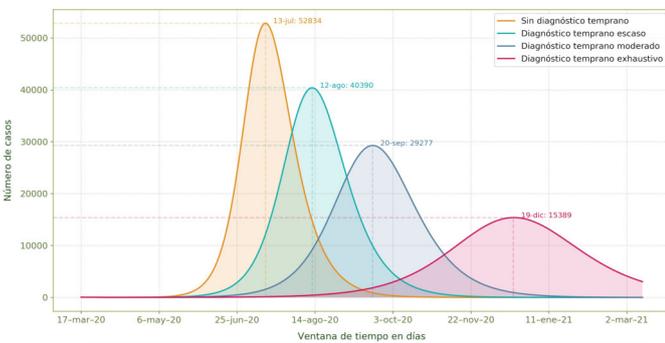


Figura 1. Escenarios de propagación del virus en pacientes con sintomatología fuerte en la provincia de Pichincha al 17 de marzo del 2020

Se considera que los pacientes con síntomas lo suficientemente fuertes como para ser documentados son los que representan I_i^r (en principio, la población que debido a sus síntomas es diagnosticada por el sistema de salud), mientras que todas las otras personas infecciosas (en principio no diagnosticadas) representan la variable I_i^u . La constante β_i representa la tasa de transmisión debida a los casos de personas enfermas documentadas en la ciudad/provincia i , mientras que la tasa de transmisión de los casos no detectados es la misma β_i , reducida por un factor $0 \leq \mu_i \leq 1$. Esto último se debe a que la carga viral en las personas con pocos o ningún síntoma no es tan alta como en las personas que ya han sido documentadas. En Li et al (2020) se sostiene que las personas infectadas no documentadas en Wuhan fueron la mitad de contagiosas que las personas documentadas (antes del 23 de enero de 2020): $\mu = 0.55$; 95% CI: 0.46-0.62. Los otros parámetros del modelo son: α que representa la fracción de las infecciones documentadas que desarrollaron síntomas severos, Z el tiempo promedio de latencia (tiempo de incubación del virus), D el tiempo promedio de duración del período infeccioso y ρ la tasa de recuperación. Se debe aclarar que R_i representa la población que luego de pasar por el período infeccioso, tiene inmunidad, al menos temporal. De acuerdo a los epidemiólogos, una vez que esta población cruce un umbral, la pandemia se da por controlada, al menos temporalmente.

Un parámetro fundamental de la epidemia es el número efectivo de reproducción R_e , el cual mide el número promedio de casos nuevos que genera un caso confirmado. En este modelo, este indicador se lo calcula, para la ciudad/provincia i , mediante

$$R_e^i := \alpha \beta_i D + (1 - \alpha) \mu_i \beta_i D.$$

Si este número se sostiene por encima de 1, la enfermedad seguirá expandiéndose (Ridenhour et al (2015)). Así, la meta es bajar este número por debajo de 1.

Finalmente, M_{ji} representa el número de personas que se desplazan desde la ciudad/provincia j a la ciudad/provincia i , mientras que θ es un factor superior a uno, el cual se usa para corregir posibles subregistros de la movilidad de las personas. Estos criterios de movilidad son clave en el escenario global actual, donde la población está activamente interconectada y la movilidad es, si no imposible, muy difícil de suspender.

Para la estimación de los diferentes parámetros en el modelo (11) usamos el esquema variacional presentado previamente (ver la subsección 2.2). Para la información de fondo de los parámetros, utilizamos los intervalos de confianza calculados en Li et al (2020) que, aunque obtenidos en un contexto socio-cultural distinto, proveen una primera estimación, así como una medida de la incertidumbre. Estos intervalos son los siguientes:

- Tasa de transmisión de la población infectada reportada: $0.8 \leq \beta \leq 1.5$.
- Factor de reducción de la tasa de transmisión de población infectada no reportada: $0.2 \leq \mu \leq 1$.
- Factor multiplicativo de corrección de los datos de movilidad de la población: $1 \leq \theta \leq 1.75$.
- Tiempo promedio de días de latencia: $2 \leq Z \leq 5$, días.
- Fracción de pacientes que desarrollaron síntomas fuertes: $0.02 \leq \alpha \leq 1$.
- Tiempo promedio de días de duración de la infección: $2 \leq D \leq 5$, días.

Asumiendo una sola provincia aislada e introduciendo el vector de parámetros $P := (\beta, \mu, \alpha, Z, D)^T$, el problema inverso de identificación de parámetros está formulado mediante:

$$\begin{aligned} \min_{P \in \mathcal{U}_{ad}} & \sum_{i,j} (I^r(t_i) - I_i^{r,obs}) C_{ij}^{-1} (I^r(t_j) - I_j^{r,obs}) \\ & + (P - P^b)^T \mathbf{B}^{-1} (P - P^b) = J(\bar{P}) \\ \text{s.t.} & \frac{dS}{dt} = -\frac{\beta S I^r}{N} - \frac{\mu \beta S I^u}{N}, & S(t_0) = S_0, \\ & \frac{dE}{dt} = \frac{\beta S I^r}{N} + \frac{\mu \beta S I^u}{N} - \frac{E}{Z}, & E(t_0) = E_0, \\ & \frac{dI^r}{dt} = \alpha \frac{E}{Z} - \frac{I^r}{D}, & I^r(t_0) = I_0^r, \\ & \frac{dI^u}{dt} = (1 - \alpha) \frac{E}{Z} - \frac{I^u}{D}, & I^u(t_0) = I_0^u, \\ & \frac{dR}{dt} = \frac{I^r + I^u}{D}, & R(t_0) = R_0 \end{aligned} \quad (12)$$

donde I_i^{obs} , $i = 1, \dots, n$, son las observaciones históricas de infectados reportados obtenidas a partir de los registros oficiales, $\mathbf{C} = (C_{ij})$ corresponde a la matriz de covarianza de errores de observación, \mathbf{B} es la matriz de covarianza de errores de fondo y \mathcal{U}_{ad} es el conjunto admisible conformado por intervalos a priori en los cuales deben hallarse los parámetros. Mientras que la matriz \mathbf{B} es obtenida, en nuestro caso, a partir de los intervalos de confianza reportados en Li et al (2020), la matriz \mathbf{C} es estimada tomando en cuenta tanto la confiabilidad de las pruebas serológicas PCR como el número de tests que se realizan en cada provincia a la semana. De manera específica, se tiene la fórmula:

$$\sigma_{ii}^2 = \frac{\kappa}{\eta_i} \sigma_{PCR}^2, \quad (13)$$

donde κ es la cantidad ideal de tests semanales a realizarse por cada millón de habitantes (actualmente tomamos el valor $\kappa = 4000$), η_i es la cantidad de tests por millón de habitantes realizados en la provincia bajo estudio en la semana en cuestión, y σ_{PCR}^2 es la varianza propia de las pruebas PCR.

Al tener como restricción un sistema de ecuaciones diferenciales, el problema (12) debe ser tratado como un problema de control óptimo, en el cual la variable de estado es elemento de las funciones absolutamente continuas, $AC([t_0, t_n], \mathbb{R}^5)$. Para hallar su condición de optimalidad utilizaremos la técnica del Lagrangeano.

Sean $\lambda_S, \lambda_E, \lambda_I, \lambda_U, \lambda_R$ los multiplicadores de Lagrange asociados a las restricciones diferenciales del problema (12). Definimos el Lagrangeano del problema por:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = J(P) + \int_{t_0}^{t_n} & \left(\lambda_S(t) \left[-\frac{dS}{dt} - \frac{\beta SI^r + \mu \beta SI^u}{N} \right] + \lambda_E(t) \left[-\frac{dE}{dt} \right. \right. \\ & + \left. \frac{\beta SI^r + \mu \beta SI^u}{N} - \frac{E}{Z} \right] + \lambda_I(t) \left[-\frac{dI^r}{dt} + \alpha \frac{E}{Z} - \frac{I^r}{D} \right] + \lambda_U(t) \left[-\frac{dI^u}{dt} \right. \\ & \left. \left. + (1 - \alpha) \frac{E}{Z} - \frac{I^u}{D} \right] + \lambda_R(t) \left[-\frac{dR}{dt} + \frac{I^r + I^u}{D} \right] \right) dt + \ell, \quad (14) \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} \ell = & \theta_S(S(t_0) - S_0) + \theta_E(E(t_0) - E_0) + \theta_I(I^r(t_0) - I_0^r) \\ & + \theta_U(I^u(t_0) - I_0^u) + \theta_R(R(t_0) - R_0), \end{aligned}$$

con $\theta_S, \theta_E, \theta_I, \theta_U, \theta_R$ los multiplicadores de Lagrange asociados a las condiciones iniciales de las variables de estado.

Como primer paso para obtener el sistema adjunto, debemos calcular la derivada direccional del Lagrangeano respecto a la variable de estado, $x = (S, E, I^r, I^u, R)$, en una dirección arbitraria $v = (\sigma, \xi, w, v, r) \in AC([t_0, t_n], \mathbb{R}^5)$, e igualar el resultado a cero, (ver, por ejemplo, Alekseev et al (1987); De los Reyes (2015)), es decir,

$$\mathcal{L}_x[v] = \mathcal{L}_S[\sigma] + \mathcal{L}_E[\xi] + \mathcal{L}_I[w] + \mathcal{L}_U[v] + \mathcal{L}_R[r] = 0.$$

Luego,

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_S[\sigma] = & \int_{t_0}^{t_n} \left[\frac{d\lambda_S}{dt} + \left(\frac{\beta I^r}{N} + \frac{\mu \beta I^u}{N} \right) (\lambda_E - \lambda_S) \right] \sigma dt \\ & - \lambda_S(t_n) \sigma(t_n) + \sigma(t_0) (\lambda_S(t_0) + \theta_S) = 0 \\ \mathcal{L}_E[\xi] = & \int_{t_0}^{t_n} \left[\frac{d\lambda_E}{dt} + \alpha \frac{\lambda_I}{Z} + (1 - \alpha) \frac{\lambda_U}{Z} - \frac{\lambda_E}{Z} \right] \xi dt \\ & - \lambda_E(t_n) \xi(t_n) + \xi(t_0) (\lambda_E(t_0) + \theta_E) = 0 \\ \mathcal{L}_I[w] = & \int_{t_0}^{t_n} \left[\frac{d\lambda_I}{dt} + \frac{\partial J}{\partial I^r} - \frac{\beta S \lambda_S}{N} + \frac{\beta S \lambda_E}{N} - \frac{\lambda_I}{D} + \frac{\lambda_R}{D} \right] w dt \\ & + w(t_n) (C_{nn}^{-1} (I^r(t_n) - I_n^{obs}) - \lambda_I(t_n)) + w(t_0) (\lambda_I(t_0) + \theta_I) = 0 \\ \mathcal{L}_U[v] = & \int_{t_0}^{t_n} \left[\frac{d\lambda_U}{dt} - \frac{\mu \beta S \lambda_S}{N} + \frac{\mu \beta S \lambda_E}{N} - \frac{\lambda_U}{D} + \frac{\lambda_R}{D} \right] v dt \\ & - v(t_n) \lambda_U(t_n) + v(t_0) (\lambda_U(t_0) + \theta_U) = 0 \\ \mathcal{L}_R[r] = & \int_{t_0}^{t_n} \frac{d\lambda_R}{dt} r dt - r(t_n) \lambda_R(t_n) + r(t_0) (\lambda_R(t_0) + \theta_R) = 0. \end{aligned}$$

Finalmente, ya que la dirección fue tomada de manera arbitraria, de lo anterior, se sigue que el sistema adjunto está dado por:

$$\begin{aligned} -\frac{d\lambda_S}{dt} = & \left(\frac{\beta I^r}{N} + \frac{\mu \beta I^u}{N} \right) (\lambda_E - \lambda_S), & \lambda_S(t_n) = 0 \\ -\frac{d\lambda_E}{dt} = & -\frac{1}{Z} \lambda_E + \frac{\alpha}{Z} \lambda_I + \frac{(1 - \alpha)}{Z} \lambda_U, & \lambda_E(t_n) = 0 \\ -\frac{d\lambda_I}{dt} = & \frac{\partial J}{\partial I^r} - \frac{\beta S}{N} (\lambda_S - \lambda_E) - \frac{\lambda_I}{D} + \frac{\lambda_R}{D}, & \lambda_I(t_n) = \\ & C_{nn}^{-1} (I^r(t_n) - I_n^{obs}) \\ -\frac{d\lambda_U}{dt} = & -\frac{\mu \beta S}{N} (\lambda_S - \lambda_E) - \frac{\lambda_U}{D} + \frac{\lambda_R}{D}, & \lambda_U(t_n) = 0 \\ -\frac{d\lambda_R}{dt} = & 0, & \lambda_R(t_n) = 0 \end{aligned}$$

El gradiente⁻¹ de la función objetivo se obtiene al derivar el Lagrangeano con respecto a la variable de control. Se procede de esta manera y obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \nabla_{\beta} J = & \mathbf{B}_{\beta}^{-1} (\beta - \beta^b) - \int_0^T \frac{S}{N} (I^r + \mu I^u) (\lambda_S - \lambda_E), \\ \nabla_{\mu} J = & \mathbf{B}_{\mu}^{-1} (\mu - \mu^b) - \int_0^T \beta \frac{S}{N} I^u (\lambda_S - \lambda_E), \\ \nabla_{\alpha} J = & \mathbf{B}_{\alpha}^{-1} (\alpha - \alpha^b) + \int_0^T \frac{E}{Z} (\lambda_I - \lambda_U), \\ \nabla_Z J = & \mathbf{B}_Z^{-1} (Z - Z^b) + \int_0^T \frac{E}{Z^2} (\lambda_E - \alpha \lambda_I - (1 - \alpha) \lambda_U), \\ \nabla_D J = & \mathbf{B}_D^{-1} (D - D^b) + \int_0^T \frac{1}{D^2} (I^r \lambda_I + I^u \lambda_U - \lambda_R (I^r + I^u)). \end{aligned}$$

Ya que los parámetros del problema pertenecen a un conjunto de controles admisibles \mathcal{U}_{ad} , el cual incorpora los intervalos de confianza, la condición de optimalidad está definida por la siguiente desigualdad variacional

$$\nabla J(\bar{P})^T (P - \bar{P}) \geq 0, \quad \forall P \in \mathcal{U}_{ad}. \quad (15)$$

De manera adicional, ya que \mathcal{U}_{ad} está compuesto por restricciones de caja, la desigualdad variacional puede ser remplazada por una proyección componente a componente. Para la solución del problema, por tanto, usamos un método proyectado de segundo orden, con actualización de la matriz de tipo cuasi-Newton (para más detalles, ver Kelley (1999)).

4. RESULTADOS

En esta sección presentamos, a manera de ejemplo, los resultados de la estimación de parámetros del modelo (11) para la semana del 26 de junio al 2 de julio de 2020, así como las respectivas proyecciones quincenales de casos reportados de infectados con el coronavirus en diferentes provincias del país. Cabe indicar que este tipo de estadísticas son calculadas por el *Centro de Modelización Matemática* con una periodicidad semanal y puestas a disposición de los tomadores de decisión en materia de políticas de salud.

Para la estimación de parámetros, de lo expuesto en secciones anteriores, consideramos el vector de parámetros a estimar, $P = (\beta, \mu, \alpha, Z, D)$, y calculamos sus valores mediante la solución del problema (12). Es importante recordar que este problema variacional toma en cuenta la incertidumbre de las mediciones a través de la matriz de covarianza de errores \mathbf{C} . Para la construcción de \mathbf{C} se considera el nivel de confiabilidad de las pruebas de laboratorio *PCR* y el número de tests que se realiza (ver la fórmula (13)). La resolución numérica de (12) es realizada para cada provincia en una ventana de tiempo de 7 días. Asimismo, tanto \mathbf{C} como los valores de fondo con los cuales se realiza la estimación son actualizados de forma semanal.

En la Figura 2, los puntos representan la información oficial del número de infectados reportados para cada provincia, siendo los de color naranja los correspondientes al periodo de estimación, es decir del 26 de junio al 2 de julio de 2020. Se presenta, además, en color azul, la información del número de personas infectadas en los 5 días anteriores al periodo de estudio, ya que debido al tiempo que transcurre entre la realización y la obtención de los resultados de las pruebas serológicas *PCR*, la condición inicial del problema se considera con 5 días de retraso.

Como resultado de la estimación se obtienen parámetros óptimos para el período de estudio considerado. La curva azul de la Figura 2 corresponde a la solución del modelo (11) para la variable I_t^r , es decir, la población que debido a sus síntomas es diagnosticada con el virus. Esta curva ajusta las observaciones, tomando en cuenta el modelo matemático y la incertidumbre de la data oficial.

Con los parámetros obtenidos, calculamos adicionalmente el número de reproducción efectivo R_e . Ya que el modelo es resuelto

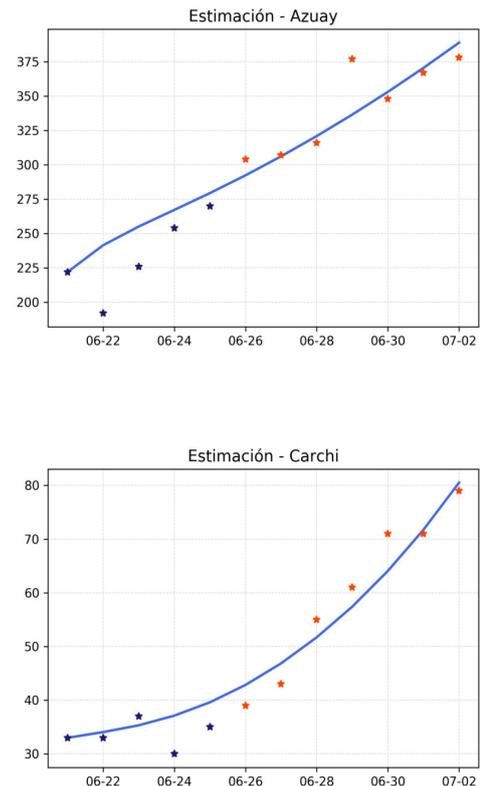


Figura 2. Estimación de parámetros en la semana del 26 de junio al 2 de julio de 2020, para las provincias de Azuay (arriba.) y Carchi (abajo.).

semanalmente, podemos también calcular un R_e actualizado con esa frecuencia. Esto es importante ya que nos permite visualizar la evolución de la epidemia en cada región de estudio, es decir, en cada provincia.

En la Figura 3 se presenta la evolución del número de reproducción efectivo R_e para las provincias de Pichincha y Guayas, desde la semana del 27 de marzo hasta la semana del 26 de junio de 2020. Los colores de las gráficas nos permiten visualizar rápidamente el estado del R_e cada semana. En rojo, se presentan aquellos valores de $R_e \geq 2$, en amarillo los valores entre $1 < R_e < 2$, mientras que en verde los valores de $R_e \leq 1$. Recordemos que si este número se sostiene por encima de 1, la enfermedad seguirá expandiéndose, siendo un indicador de que el virus empieza a estar controlado cuando el R_e se encuentra por debajo de 1.

La segunda parte de los resultados corresponde al pronóstico del número de personas infectadas oficialmente registradas. Estos pronósticos se los realiza de manera semanal para todas las provincias del país y para una ventana de tiempo de 15 días. Los parámetros que se utilizan son los calculados con la metodología descrita en este reporte. Adicionalmente, para resolver el sistema de ecuaciones consideramos aleatoriedad en los parámetros, las condiciones iniciales y los términos en el sistema de ecuaciones (Li et al (2020)). Para los parámetros y las condiciones iniciales consideramos perturbaciones normales, mientras que la estocasticidad de las ecuaciones se refleja a través de distribuciones de probabilidad de Poisson.

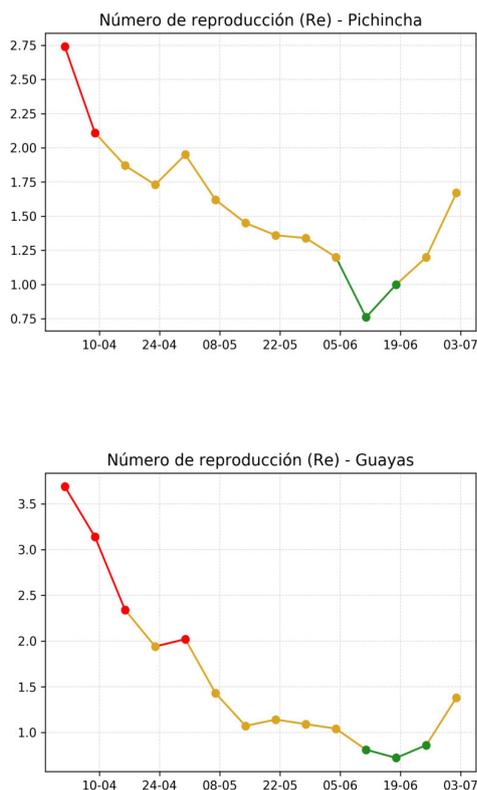


Figura 3. Evolución del número de reproducción efectivo, para la provincia de Pichincha (arriba) y la provincia de Guayas (abajo).

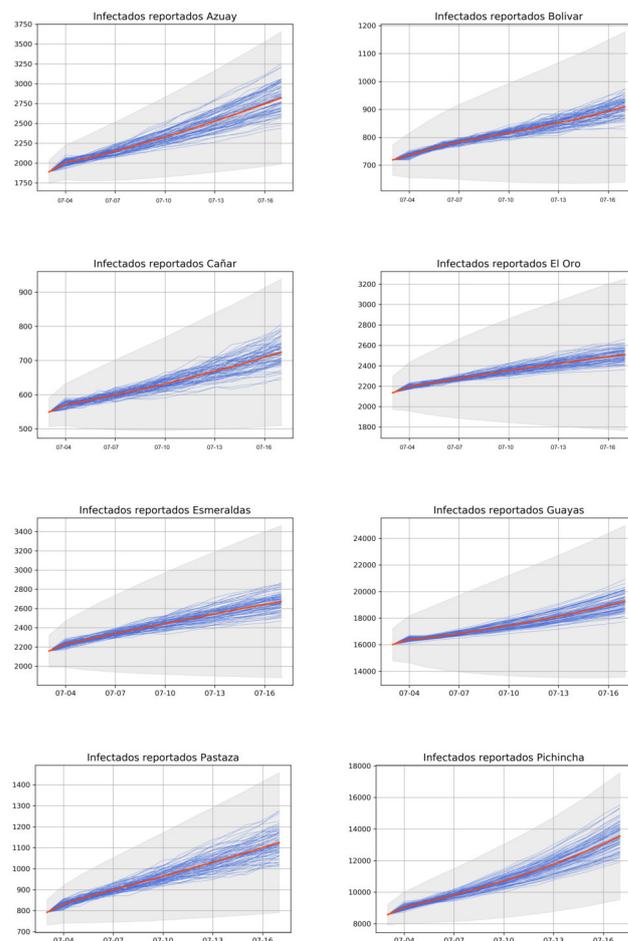


Figura 4. Pronóstico de infectados reportados acumulados para el periodo del 3 al 18 de julio del 2020. 1ra fila: Azuay(izq.), Bolívar(der.). 2da fila: Cañar(izq.), El Oro(der.). 3ra fila: Esmeraldas(izq.), Guayas(der.). 4ta fila: Pastaza(izq.), Pichincha(der.).

Para cada provincia la simulación se ejecuta con un ensamble de tamaño 80. Los resultados de estas simulaciones se presentan en la Figura 4 con líneas de color azul; para cada una de estas corridas la condición inicial es perturbada. En anaranjado se presenta la media de todas las simulaciones realizadas, mientras que el área gris representa el intervalo de confianza al 95% para el valor medio calculado. Como resultado, de entre todas las simulaciones realizadas presentamos las tres más significativas: escenario optimista (menor número de infectados reportados), escenario pesimista (mayor número de infectados reportados) y el pronóstico promedio.

En la Figura 4 se muestran las proyecciones de los casos reportados de COVID-19 (número de personas infectadas reportadas por las autoridades) de 8 de las 24 provincias del país, para el periodo del 3 al 18 de julio. La condición inicial fue tomada el día 2 de julio de 2020.

Además de los reportes gráficos, para cada provincia se obtienen tablas con los valores numéricos de los escenarios pesimista, optimista y promedio. En la Figura 5 observamos las tablas con los valores de los pronósticos para el periodo del 3 al 18 de julio del 2020 para las provincias de Esmeraldas y Santa Elena.

5. CONCLUSIONES

El monitoreo de la pandemia del SARS-CoV-2 en Ecuador requiere de la estimación rigurosa de diferentes indicadores de interés bajo condiciones de incertidumbre. Uno de las cantidades más importantes en este sentido es el número de reproducción efectivo de la pandemia, el cual requiere de la estimación robusta de los parámetros de un modelo matemático que recoja adecuadamente la dinámica viral. En este artículo presentamos el esquema desarrollado para llevar a cabo dicha tarea de manera periódica en cada región de estudio, proveyendo una herramienta importante de monitoreo y toma de decisiones.

La estimación de parámetros mediante técnicas variacionales, que utilizan un enfoque bayesiano brinda ventajas sobre otros métodos de estimación. Particularmente, en el caso ecuatoriano, esto resulta importante debido al alto nivel de incertidumbre proveniente de la data oficial; un factor determinante que no es considerado en otros enfoques.

Fecha	Escenario pesimista	Pronóstico	Escenario optimista
2020-07-03	2157	2157	2157
2020-07-04	2290	2230	2173
2020-07-05	2319	2266	2218
2020-07-06	2354	2304	2256
2020-07-07	2394	2339	2291
2020-07-08	2454	2376	2297
2020-07-09	2504	2409	2337
2020-07-10	2526	2443	2329
2020-07-11	2597	2478	2353
2020-07-12	2660	2511	2384
2020-07-13	2715	2544	2395
2020-07-14	2757	2578	2420
2020-07-15	2782	2610	2437
2020-07-16	2827	2642	2447
2020-07-17	2865	2672	2470

Fecha	Escenario pesimista	Pronóstico	Escenario optimista
2020-07-03	944	944	944
2020-07-04	960	952	942
2020-07-05	964	955	946
2020-07-06	971	960	951
2020-07-07	976	964	954
2020-07-08	982	968	956
2020-07-09	988	973	960
2020-07-10	1000	977	962
2020-07-11	1008	981	963
2020-07-12	1026	985	962
2020-07-13	1028	990	971
2020-07-14	1035	994	969
2020-07-15	1047	998	970
2020-07-16	1054	1003	973
2020-07-17	1072	1008	974

Figura 5. Tablas con proyecciones de infectados reportados acumulados para el periodo del 3 al 18 de julio del 2020 de Esmeraldas(arriba) y Santa Elena(abajo).

La metodología para la construcción de las matrices de covarianza, presentes en el funcional de costo, permite incorporar la mencionada incertidumbre. En efecto, la construcción de C toma en cuenta la confiabilidad de las pruebas serológicas PCR, así como el número de test que se realizan en una población determinada. Mientras menos tests se realicen, la varianza será más alta.

Las soluciones del sistema de ecuaciones que modelan la propagación del virus, dependen fuertemente de los parámetros del modelo, siendo los dos coeficientes dominantes: el índice de contagio y la diseminación del virus por parte de los infecciosos no-documentados. En este sentido, las soluciones que más se aproximen a la realidad en el caso ecuatoriano serán aquellas cuyos parámetros hayan sido estimados utilizando una metodología que considere las particularidades de la región de estudio, como las descritas en este artículo.

Las proyecciones de propagación del virus consideran aleatoriedad en los parámetros, las condiciones iniciales y los diferentes términos en el sistema de ecuaciones diferenciales del modelo.

Gracias a la aleatoriedad podemos realizar varias simulaciones y presentar distintos escenarios para cada región de estudio.

REFERENCIAS

- Alekseev, V.M., Tikhomirov, V.M., and Fomin, S.V. (1987). *Optimal Control*. Springer Science and Business Media
- Asch, M., Bocquet, M., and Nodet, M. (2016). *Data assimilation: methods, algorithms, and applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Aster, R., Borchers, B. and Thurber, C.H. (2013). *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Academic Press.
- Brauer, F., Castillo-Chávez, C. (2001). *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. Springer.
- Chowell, G. (2017). Fitting dynamic models to epidemic outbreaks with quantified uncertainty: A primer for parameter uncertainty, identifiability, and forecast. *Infectious Disease Modelling*. DOI: 10.1016/j.idm.2017.08.001
- De los Reyes, J.C. (2015). *Numerical PDE-Constrained Optimization..* Springer Verlag.
- Kelley, C.T. (1999). *Iterative Methods for Optimization*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Lauer, S.A., Grantz, K.H., Bi, Q., Jones, F.K., Zheng, Q., Meredith, H.R, Azman, A.S., Reich, N.G., Lessler, J. (2020). The Incubation Period of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) From Publicly Reported Confirmed Cases: Estimation and Application. *Annals of Internal Medicine*. DOI: 10.7326/M20-0504
- Li,R., Pei,S., Chen,B., Song,Y., Zhang,T., Yang, W. and Shaman, J. (2020). Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV2).*Science*. DOI: 10.1126/science.abb3221
- Ridenhour, B., Kowalik, J.M. and Shay, D.K. (2015). El número reproductivo básico (R0): consideraciones para su aplicación en la salud pública. *PanAmerican Journal of Public Health*. DOI: 10.2105/AJPH.2013.301704
- Verity, R., Okell, L. C., Dorigatti, I., Winskill, P., Whitaker, C., Imai, N., and Dighe, A. (2020). Estimates of the severity of coronavirus disease 2019: a model-based analysis. *The Lancet infectious diseases*. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30243-7](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30243-7)

Wu, D., Wu, T., Liu, Q. and Yang, Z. (2020). The SARS-CoV-2 outbreak: what we know. *International Journal of Infectious Diseases*. DOI: 10.1016/j.ijid.2020.03.004

diferenciables y modelamiento de problemas provenientes de las biociencias. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8178-8834>

BIOGRAFÍAS



Paula M. Castro C. Estudiante del Programa de Doctorado en Matemática Aplicada de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) e investigadora del centro de Modelización Matemática (MODEMAT). Ingeniera Matemática de la EPN (2015) y Magister en optimización matemática (2017) por la misma casa de estudios. Su área de estudios es el análisis

variacional de problemas de asimilación de datos. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2560-9096>



Juan Carlos De los Reyes. Ph.D. en Matemática. Director del Centro de Modelización Matemática (MODEMAT). Profesor en el área de optimización y control del departamento de matemática de la EPN. Es autor de varios artículos científicos y ha realizado investigaciones y ponencias en universidades y centros de investigación de varios países.

Es miembro activo de la Academia de Ciencias del Ecuador (ACE) y de la Academia Mundial de Ciencias (TWAS). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2761-5382>



Sergio González-Andrade. Ph.D. en Matemática. Director del programa doctoral en Matemática Aplicada de la Escuela Politécnica Nacional (EPN). Investigador del centro de Modelización Matemática (MODEMAT) y profesor del departamento de matemática de la EPN. Sus áreas de investigación son la simulación numérica de fluidos no-Newtonianos

así como el estudio de los métodos multimalla y el análisis de los métodos de Newton generalizados. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7022-1245>



Pedro Martín Merino Rosero. Ph.D. en Matemática. Coordinador del laboratorio nacional de cálculo científico HPCModemat. Investigador del centro de Modelización Matemática (MODEMAT) y profesor del departamento de matemática de la EPN. Actualmente sus intereses científicos se centran en métodos de optimización de problemas no

Determinantes de la Productividad Laboral para las Empresas Ecuatorianas en el Periodo 2009-2014

Quijia-Pillajo, Jonathan ¹ ; Guevara-Rosero, Carolina ^{2,*} ; Ramírez-Álvarez, José ² 

¹Ingeniería en Ciencias Económicas y Financieras, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

²Departamento de Economía Cuantitativa, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

Resumen: Este estudio determina los factores que afectan la productividad laboral de las empresas en Ecuador, incorporando factores externos a la empresa como las economías de aglomeración. Utilizando la información a nivel de empresas de la encuesta de ciencia, tecnología e innovación de los años 2011 y 2014, se emplea un modelo de regresión múltiple y se estima la productividad a través del método de mínimos cuadrados ordinarios. Los resultados indican que un aumento de un punto porcentual de la proporción de trabajadores con educación terciaria aumenta la productividad laboral en 1%. Si las empresas exportan o se adhieren a un grupo empresarial, su productividad laboral aumentaría en 41% y 27,7%, respectivamente. Otros factores que aumentan la productividad son el estatus multiplanta y la inversión de capital fijo. Además de los factores individuales, los factores externos como la densidad de empresas y la competencia en un sector y región dados pueden incentivar la productividad individual de las empresas.

Palabras clave: Empresas, Productividad laboral, Ecuador.

Determinants of Labor Productivity for Ecuadorian Companies in the Period 2009-2014

Abstract: This study determines the factors that affect the labor productivity of firms in Ecuador, introducing for the first time external factors such as agglomeration economies. Using the information at the firm level of the Science, Technology and Innovation Survey of 2011 and 2014, a multiple regression model is estimated with the Ordinary Least Squares method. The results indicate that an increase of one percentage point in the proportion of workers with tertiary education leads to an increase of labor productivity of 1%. If firms export or operate in a corporative group, their productivity would increase in 41% and 27,7%, respectively. Other factors that increase the productivity are the multiplant status and the investment in fixed capital. Apart from these individual factors, the external factors such as the density and the level of competition of the firms in a given sector and region boost the individual productivity of firms.

Keywords: Firms, labor productivity, Ecuador.

1. INTRODUCCIÓN

La productividad es uno de los factores más importantes en el crecimiento económico. A nivel micro, la productividad determina la competitividad de las empresas para permanecer activas en el mercado (Medina, 2010), y a nivel macro, la productividad constituye un elemento clave para el crecimiento económico, la evolución de los salarios y el mantenimiento y mejora del nivel de vida de la población (Carro & Gonzales, 2012).

Las diferencias de productividad son una de las principales fuentes de divergencia de ingresos entre países. Para disminuir la brecha existente, es entonces pertinente conocer los factores que impulsan la productividad en los países en vías de

desarrollo. Este estudio contribuye a la literatura en este respecto, analizando el caso de Ecuador.

Según el Euromonitor International, para el año 2013, Ecuador tuvo una productividad laboral de apenas \$ USD 15 370, mientras que el promedio para América latina fue de \$ USD 18 351, y el promedio para los países de la OECD fue de \$ USD 77 929. Pese a que en el Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021, el objetivo 5 establece que el Estado debe impulsar la productividad y competitividad para el crecimiento económico sostenible de manera redistributiva y solidaria, se evidencia que los niveles de la productividad aún son relativamente bajos, en relación con países desarrollados y con el contexto sudamericano.

*carolina.guevara@epn.edu.ec

Recibido: 20/02/2020

Aceptado: 06/01/2021

Publicado: 28/02/2021

10.33333/rp.vol47n1.02

CC BY 4.0

En este sentido, el presente trabajo se enfoca en determinar los factores que afectan la productividad laboral a nivel de empresas. Para ello, se utiliza la encuesta de Ciencia, Tecnología e Innovación realizada por el Instituto Nacional Ecuatoriano de Censos para el año 2011 y 2014. Se emplea la metodología de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) cuyos resultados se los interpreta de manera correlacional.

Los principales resultados indican que, si una empresa contrata personal con altos niveles de educación, podría incrementar la productividad en un 1%. El aumento del 1% en la inversión en capital fijo produce un incremento de la productividad del 2,24%. Operar en los mercados internacionales y tener una empresa multiplanta incrementan la productividad en un 41% y 10,6%, respectivamente. Adicionalmente, la adherencia a un grupo empresarial y el capital extranjero producen un incremento de la productividad del 27,7% y 33,3% respectivamente.

Además, se encontró que las empresas ecuatorianas no se benefician de la especialización. Lo que sí afecta positivamente a la productividad es la competencia y la densidad. Por un lado, la competencia impulsa a las empresas a adoptar nuevos procesos de producción más eficientes, para permanecer en el mercado. Por otro lado, la densidad favorece los mecanismos de aprendizaje, cooperación e intercambio que influyen positivamente en la productividad.

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se hace una revisión de la literatura concerniente a la productividad. La sección 3 muestra la metodología y estadísticas descriptivas básicas de los datos a utilizar: se presenta la fuente de datos, se expone la técnica econométrica a utilizarse y se describen las variables de análisis. A continuación, en la sección 4 se muestran los resultados de las variables que afectan a la productividad. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones de la investigación, y se hace algunas recomendaciones de política.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Uno de los conceptos más relevantes en el análisis de los procesos de desarrollo económico en la actualidad es la productividad, ya que es uno de los factores más importantes para el crecimiento económico (López, Barcenilla, & Mancebon, 2008). A nivel microeconómico, la alta productividad laboral implica altos ingresos reales tanto para el trabajador como para las empresas. Las empresas reducen sus costos y pueden tener una mejor posición en el mercado internacional (Medina, 2010).

En términos generales, la productividad es una característica empresarial que indica cuan eficiente es el uso de los recursos en la producción de bienes y servicios (Unger, Flores, & Ibarra, 2014). Dicha característica depende no solo del trabajo y capital, sino también de la internalización de las empresas en los mercados internacionales, la composición del capital, de la política y de la geografía. A continuación, se realiza una breve revisión de esta literatura.

2.1 Tamaño

Benavente (2005) sugiere que las empresas grandes tienen mayor acceso a recursos tecnológicos, financieros, capital humano, lo cual las hace más competitivas y más productivas. Además, las empresas de mayor tamaño pueden ser más productivas por la presencia de economías de escala (Bogetic & Olusi, 2013).

Por su parte, Chudnovsky, López & Pupato (2006), en su trabajo acerca de la innovación y productividad para Argentina, encuentran una relación negativa y significativa con el tamaño de las empresas, es decir, las pequeñas empresas son más productivas que las grandes empresas. Los autores sugieren que las empresas pequeñas tienen la capacidad de adaptarse a cambios en el mercado, lo cual es mucho más difícil para las grandes empresas que tienen por lo general un gran número de empleados y gran capital invertido.

2.2 Edad

Según la literatura, el efecto de la edad de las empresas sobre su productividad es ambiguo. Por un lado, en los trabajos de Bogetic & Olusi (2013) y Hall, Mairesse, & Lotti (2012), se encuentra que las empresas más jóvenes tienden a ser más eficientes que las antiguas, debido a que, para las empresas antiguas, el conocimiento, las habilidades y destrezas se vuelven obsoletos e inducen el deterioro de la organización. En cambio, Roper, Du, & Love (2008), en su estudio sobre la cadena de valor para China, determinan que a medida que los años de una empresa aumentan, las empresas son más productivas. El autor argumenta que las empresas con mayor tiempo en el mercado pueden acumular experiencia y conocimiento productivos, haciéndolas más eficientes, y por tanto más productivas.

2.3 Multiplanta

Crowley & Mccann (2015) sugieren que las empresas que descentralizan su sistema de producción pueden aumentar su eficiencia con un proceso de producción dividido en fases, en establecimientos separados y, en lugares favorables. La localización de estas unidades afecta tanto a la eficiencia como a la competitividad de las empresas, pues esto no solo está relacionado con el área de operaciones, sino también con la función comercial y financiera (Rosales, 2018).

2.4 Estatus exportador

La liberación y la intensificación del comercio desempeñan un papel importante sobre la productividad, a través de cinco canales potenciales: mayor variedad de los bienes intermedios, mejor calidad, difusión del conocimiento, amplificación de los efectos de aprendizaje y aumento del tamaño del mercado (Echavarría, Arbeláez & Rosales, 2006; Álvarez & Gutiérrez, 2011). El entorno competitivo se vuelve más fuerte cuando se opera en los mercados internacionales, por tanto, las empresas necesitan mejorar su eficiencia a un ritmo mucho más rápido, a diferencia de las empresas que compiten en el mercado nacional (Silva & Africano, 2013).

2.5 Grupo empresarial

Los grupos empresariales pueden facilitar aquellos intercambios que, de otro modo, no podrían ocurrir a través de los mercados. Por lo tanto, desempeñan un papel positivo en el desarrollo y rendimiento de la empresa, reduciendo los costos de transacción (Khanna & Yafeh, 2007). Esto permite a las empresas dentro de los grupos emprender actividades económicas que no pueden ser mediadas a través de mercado.

Los grupos también pueden desempeñar un papel importante en la adquisición de tecnología y transferencia de conocimientos (Amsden & Hikino, 1994). Como tal, la afiliación a grupos empresariales ha sido vista por algunos especialistas como una causa clave del rápido crecimiento de la productividad en el proceso dinámico de la industrialización.

2.6 Capital extranjero

Alderete & Gutiérrez (2012), en su estudio sobre la productividad para las empresas colombianas, determinaron que el capital extranjero tiene un impacto positivo sobre la productividad laboral. Las empresas con capital extranjero tienen más acceso a las nuevas tecnologías por la relación con su casa matriz, la cual les ofrece asesoría técnica y otros servicios tecnológicos (Chong-Sup, 1997).

2.7 Capital humano

Las empresas que poseen personal con un alto nivel de estudios son más productivas (Álvarez & Gutiérrez, 2011). Los empleados con altos niveles de educación poseen habilidades, conocimientos y capacidades que ayudan a las empresas a alcanzar objetivos y soluciones de manera eficiente (Yang, Lin & Ma, 2010; Yunus, Said & Law, 2014). Además, los trabajadores con altos niveles de educación poseen conocimientos que les permite ser capaces de aplicar, desarrollar y conservar tecnologías más sofisticadas (Alderete & Gutiérrez, 2012).

2.8 Sector industrial

El sector donde operan las empresas también es un factor importante en la productividad. Los sectores difieren sustancialmente debido a la existencia de características particulares en cuanto a las oportunidades tecnológicas, las bases de conocimiento, y acumulación del avance técnico (Crowley & Mccann, 2015; Echavarría, Arbeláez, & Rosales, 2006; Željko & Olasupo, 2013).

2.9 Capital fijo

La inversión destinada a los procesos de producción es clave para la productividad de las empresas (Benavente, 2005). Faruq & Telaroli (2011) establecen que una mayor disponibilidad de capital físico en el proceso de producción permite a cada trabajador producir más en un periodo de tiempo determinado y, por lo tanto, ser más productivo.

2.10 Maquinaria y equipo

Los beneficios de la adquisición en maquinaria y equipo se pueden traducir en ahorros en la mano de obra, eficiencia de costos de operación y reducción de tiempos en los procesos de producción, provocando un incremento de la productividad (Ludym, Luzardo & Rojas, 2018; Álvarez & Gutiérrez, 2011).

2.11 Economías de aglomeración, competencia y densidad

Las economías de densidad, que consisten en la concentración geográfica de empresas de cualquier tipo, generan una serie de ventajas, tal como una gran disponibilidad de fuerza laboral, infraestructura y bienes públicos (Harrison, Kelley, & Gant, 1996). Dichas ventajas pueden afectar positivamente a la productividad (Combes & Gobillon, 2015; Ciccone & Hall, 1996; Abel, Dey & Gabe, 2011). En general, se encuentra que la proximidad geográfica entre las empresas y los empleados facilita los micro-mecanismos de cooperación, intercambio y aprendizaje (Duranton & Puga, 2003).

Las economías de aglomeración se pueden distinguir por la estructura de la concentración de las empresas: dentro de una misma industria, también llamadas de especialización, o de diferentes industrias, también llamadas de diversificación. Estas economías de aglomeración desempeñan un rol importante en la productividad, a través de externalidades de conocimiento generadas (Guevara et al., 2018; Torrez & Ordoñez, 2019). Según Glaeser et al. (1992), las economías de especialización o externalidades MAR permiten a las empresas acceder fácilmente a la mano de obra e insumos especializados que se requieren en la misma industria, con lo que pueden reducir costos y mejorar la calidad del producto (Baldwin, Brown, & Rigby, 2008). La concentración espacial de empresas de la misma industria también puede facilitar los contactos cara a cara, el flujo de ideas entre las empresas de una industria y oportunidades de cooperar. Como consecuencia, el conocimiento y los métodos de producción se difunden y pueden surgir innovaciones que aumentan la productividad.

Las economías de diversificación o externalidades de Jacobs consisten en efectos positivos derivados de la concentración geográfica de empresas de diferentes industrias. De acuerdo con Jacobs (1969), dicha diversidad concentrada promueve la difusión del conocimiento, así como la disponibilidad de un gran panel de servicios que facilita la producción y da como resultado actividades innovadoras.

La intensidad de la competencia es otro determinante de la productividad, ya que la competencia local lleva a las empresas a innovar o adoptar nuevos procesos de producción más eficientes para mantenerse en el mercado (Porter, 1990; Porter, 1980).

3. DATOS Y METODOLOGÍA

3.1 Datos

Para la elaboración del presente trabajo, se emplea la información de la Encuesta Nacional de Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación (ACTI) realizada por el

Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), en los años 2011 y 2014. Esta encuesta tiene una cobertura nacional y cuenta con 7 055 empresas para el año 2 014 y 2 815 para el año 2 011. En base a estos datos, se construyó un pool de datos a fin de obtener la mayor cantidad de información. Después de realizar la depuración de datos, que consistió en eliminar datos perdidos e identificar inconsistencias, la base final cuenta con 7 957 observaciones.

3.2 Descripción de las variables

En la Tabla 1 se muestra la descripción de la variable independiente y de las variables independientes con su efecto esperado según la literatura revisada en la sección 2.

Tabla 1. Descripción de las variables

Variables	Descripción	Efecto esperado
<i>Variable dependiente</i>		
Productividad laboral	Logaritmo de las ventas sobre el número de empleados de la empresa <i>i</i> en el año <i>t</i>	
<i>Variables independientes</i>		
Capital humano	Porcentaje de empleados con educación terciaria sobre el total de empleados en la empresa <i>i</i> .	+
Inversión en capital fijo	Logaritmo de la inversión en capital fijo de la empresa <i>i</i> en el año <i>t</i>	+
Edad	Tiempo que la empresa <i>i</i> lleva operando hasta el año <i>t</i> .	+/-
Multiplanta	Toma el valor de 1, si la empresa <i>i</i> tiene más de un establecimiento, y 0 en caso contrario	+
Estatus exportador	Toma el valor de 1, si la empresa <i>i</i> ha realizado exportaciones, y 0 en caso contrario.	+
Capital extranjero	Toma el valor de 1, si el capital extranjero de la empresa <i>i</i> es mayor al 10%, y 0 en caso contrario.	+
Grupo empresarial	Toma el valor de 1, si la empresa <i>i</i> pertenece a un grupo empresarial, y 0 en caso contrario.	+
Gasto en maquinaria y equipo	Toma el valor de 1, si la empresa <i>i</i> ha realizado inversión en maquinaria y equipo en el año <i>t</i> , y 0 en caso contrario.	+
<i>Sectores industriales</i>		
Servicios	Variable categórica que toma el valor de 1 si la empresa <i>i</i> pertenece a una de las categorías: manufactura, comercio, minas y canteras y servicios. La categoría de referencia es Servicios.	+/-
T14	Toma el valor de 1 si la empresa pertenece al año 2014, 0 si pertenece al año 2011	+/-

Elaboración: Autor

Otras variables que están relacionadas con la productividad laboral son los índices de economías de aglomeración. A continuación se detalla la forma de cálculo de cada índice según Combes (2000).

Índice de especialización

$$spe_s = \frac{empl_{s,p}/empl_p}{empl_s/empl}$$

Donde $empl_{s,p}$ es el número de empleados en el sector económico *s* en la provincia *p*, $empl_p$ es empleo en la provincia *p*, $empl_s$ es el empleo del sector económico *s* y $empl$ es el empleo total.

Índice de diversidad

Si bien las economías de urbanización se miden comúnmente a través del inverso del índice Herfindahl, construido a partir de la participación de las industrias en el empleo local, con la excepción de la industria que se considera, esta variable se normaliza por la misma variable a nivel de país:

$$div_{s,p} = \frac{1/\sum_{s'=1, s' \neq s}^S (empl_{s',p}/(empl_p - empl_{s,p}))^2}{1/\sum_{s'=1, s' \neq s}^S (empl_{s'}/(empl - empl_s))^2}$$

Donde $empl_{s',p}$ es el empleo del sector *s* (sujeto de análisis) de la provincia *p*, $empl_p$ es el empleo de la provincia *p*, $empl_{s,p}$ es el empleo del sector *s* de la provincia *p*, $empl_{s'}$ es el empleo del sector *s* (sujeto de análisis), $empl$ es el empleo total y $empl_s$ es el empleo en el sector *s*. El numerador es máximo cuando todos los sectores, excepto el sujeto del análisis s' , son del mismo tamaño en las ciudades. El índice mide el nivel de diversidad del sector económico *s* en la provincia *p*. Por lo tanto, no está necesariamente relacionado con el nivel de especialización de la industria que se analiza.

Índice de Competencia

$$comp_{s,p} = \frac{1/\sum_i^N (empl_{i,s,p}/empl_{s,p})^2}{1/\sum_i^N (empl_{i,s}/empl_s)^2}$$

Donde $empl_{i,s,p}$ es el empleo de la empresa *i* perteneciente al sector *s* y ubicada en la provincia *p*, $empl_{i,s}$ es el empleo de la empresa *i* en el sector *s* a nivel nacional, $empl_{s,p}$ es el empleo en el sector *s*, en la provincia *p*, y $empl_s$ es el empleo en el sector *s*.

Índice de densidad

$$den_{s,p} = \frac{f_{s,p}/\text{área}_p}{f_s/\text{área}}$$

Donde $f_{s,p}$ es el número de empresas en el sector *s* localizada en la provincia *p* y área_p es el área de la provincia *p*. En el denominador, f_s es el número de empresas del sector *s* y área es la superficie total del país.

3.3 Estadísticos descriptivos

La productividad laboral promedio de las empresas ecuatorianas es de \$306 804,3. Es decir, cada empleado por empresa genera en promedio aproximadamente un ingreso de 300 mil dólares al año. Desagregando la productividad por tamaño de las empresas se tiene lo siguiente: Las empresas pequeñas y grandes son las que presentan mayores niveles de productividad laboral. Las empresas pequeñas tienen una

productividad de USD 276 141,7, mientras que las empresas grandes tienen una productividad de USD 776 071,2.

En cuanto a las variables independientes dicotómicas, se tiene que el 30,5% de las empresas poseen un capital humano con educación terciaria, el 29% son de carácter multiplanta y el 11% son de carácter exportador. Asimismo, se tiene que el 10% de las empresas poseen capital extranjero alto y el 16% de las empresas pertenecen a un grupo empresarial. Respecto a las variables continuas, las empresas ecuatorianas en promedio invierten alrededor de \$922 756,3 anuales en capital fijo, y tienen una edad promedio de 18 años.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos

Variables	Media	Ds.	Mín.	Máx.
<i>Var. dependiente</i>				
Productividad laboral	306 804,3	3131 568	1	152 175 700
<i>Productividad por tamaño</i>				
Pequeña	276 141,7	2570 568	11,33	133 238 300
Mediana	166 726,5	526 439,4	88,25	10 401 800
Grande	776 071,2	6973 437	1	152 175 700
<i>Var. independientes</i>				
Inv. capital fijo	922 756,3	18400 000	1	1069394000
Edad	18	14,2	1	196
SPECsp	1,08	0,6	0,04	12,3
DIVERsp	2,03	0,4	1	3
COMPsp	0,26	0,1	0,01	0,6
DENsp	4,38	3	2,96	10
Capital humano	30,50%			
Multiplanta	29,20%			
Estatus exportador	11,20%			
Capital extranjero	9,60%			
Grupo empresarial	15,90%			
Gasto en maquinaria	27,20%			
<i>Sectores industriales</i>				
Comercio	25,3%			
Minas y canteras	3,1%			
Manufactura	29,2%			
Servicios				
<i>Transporte</i>	6,5%			
<i>Act. profesionales</i>	7,25%			
<i>Alojamiento</i>	5,57%			
<i>Otros servicios</i>	22,97%			

Fuente: Encuesta de actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación 2011 y 2014 reportado por el INEC. Elaborado por: El autor.

Nota: El sector "Otros Servicios" comprenden: Sector financiero e inmobiliario, Comunicaciones, Salud, Agua Potable y Energía Eléctrica

En cuanto a los sectores industriales, se puede observar que la de industria de servicios es la más predominante, seguida de la industria manufactura. Estos resultados nos indican que la industria de servicios es un sector muy importante para el Ecuador, ya que podría generar empleo, inversión, entre otros. Finalmente, respecto a las economías de aglomeración, urbanización, competencia y densidad, se tiene que las

provincias ecuatorianas tienen una especialización relativamente baja (media 1,08), son altamente diversas (media 2,03), y presentan una baja dispersión del empleo (media 0,26). Además, se puede establecer que existen alrededor de cuatro empresas por kilómetro cuadrado en un sector *s* y una provincia *p*. Analizando un poco más detalladamente la densidad en las provincias se tiene lo siguiente en la Tabla 3. La provincia más densa es la provincia de Pichincha, con alrededor de 8 empresas por kilómetro cuadrado. En segundo y tercer lugar se tiene a las provincias de Tungurahua y el Guayas con 5 empresas y 4 empresas por kilómetro cuadrado, respectivamente. Las provincias menos densas son las provincias de Pastaza y Morona Santiago con un valor de 0,4 y 0,7 respectivamente. Estas provincias pertenecen a la región amazónica por lo que es muy difícil abrir una empresa, ya implicaría altos costos de transporte, falta de mano de obra especializada etc.

Tabla 3. Ranking de las provincias más densas

Posición	Provincia	DENsp
1	Pichincha	8,16
2	Tungurahua	4,95
3	Guayas	4,05
4	El Oro	3,16
5	Azuay	3,08
6	Santo Domingo	2,08
7	Imbabura	1,51
8	Santa Elena	1,01
9	Cotopaxi	0,87
10	Chimborazo	0,84
11	Los Ríos	0,77
12	Carchi	0,70
13	Manabí	0,66
14	Loja	0,66
15	Cañar	0,63
16	Bolívar	0,38
17	Esmeraldas	0,24
18	Zamora Chinchipe	0,22
19	Galápagos	0,21
20	Sucumbíos	0,14
21	Orellana	0,13
22	Napo	0,08
23	Morona Santiago	0,07
24	Pastaza	0,04

Elaboración: El autor

3.4. Metodología

Con el fin de hallar los factores determinantes de la productividad laboral considerando las variables independientes antes mencionadas, se utiliza un pool de datos que se estima a través del método de mínimos cuadrados ordinarios. Este método consiste en minimizar la suma de los cuadrados de las distancias entre los valores de los datos y los

valores ajustados por el modelo. Formalmente, este modelo tiene la siguiente especificación:

$$y_i = \alpha_0 + \alpha x_i + \delta T + \epsilon_i \quad (1)$$

donde y_i el logaritmo natural de la productividad laboral, x_i es un vector de variables explicativas relacionadas con la productividad laboral, α es el vector de parámetros, T es una variable dicotómica relacionada con el año de la encuesta, δ es el coeficiente correspondiente a este año, y ϵ_i es el término de error que sigue una distribución normal.

Para la validación del modelo, se analiza la heterocedasticidad, multicolinealidad, la posibilidad de que exista una variable omitida y la normalidad en los residuos. Para analizar el posible error de especificación en la forma funcional, se utiliza el test de Ramsey. Los resultados nos indican que no se puede rechazar la hipótesis de que el modelo tiene una forma lineal ($\text{Prob} > F = 0,0000$). Respecto a la multicolinealidad, se utiliza el factor de inflación de la varianza (VIF). Los resultados nos indican que no hay un problema de multicolinealidad pues en promedio el VIF tiene un valor de 1,73, y de forma individual el VIF no es mayor a 3,74. Al analizar la distribución de los errores estandarizados, se identificaron valores atípicos que superan las dos desviaciones estándar. Estas observaciones (387) fueron eliminadas. Finalmente, para analizar la normalidad de los residuos, se utilizan los tests de Skewnes y Kurtosis, los cuales indican que no hay normalidad. Sin embargo, por el gran número de observaciones y el tratamiento adecuado de datos atípicos, los estimadores tienden a ser insesgados y consistentes. Además, los datos no se alejan de manera significativa de la curva de normalidad como se puede observar en la Figura 1. Es necesario advertir que la estimación del modelo no corrige la endogeneidad de las variables independientes (es decir, la posibilidad que la productividad afecte por ejemplo el tamaño de la empresa). En este sentido, los resultados que se muestran a continuación son correlacionales y no causales.

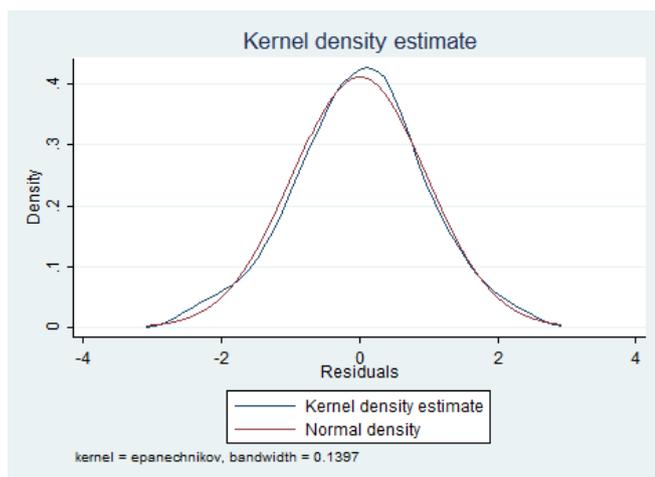


Figura 1. Prueba gráfica de normalidad de Kernel

4. RESULTADOS

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la estimación de la productividad laboral para las empresas ecuatorianas.

Tabla 4. Estimación de la productividad laboral

Variables independientes	Productividad laboral	Error estándar
Capital humano	1.006***	(0,05)
Ln capital fijo	0.0224***	(0,0022)
Edad	0.0053***	(0,0015)
Edad^2	-0.0000241	(0,00001)
Multiplanta	0.106***	(0,025)
Exportador	0.4102***	(0,039)
Capital extranjero	0.333***	(0,044)
Grupo empresarial	0.277***	(0,033)
Maquinaria y Equipo	-0.119***	(0,027)
T14	0.7648***	(0,029)
<i>Índices de aglomeración</i>		
Especialización	-0.1025***	(0,023)
Diversidad	0.026	(0,035)
Competencia	0.4246***	(0,132)
Densidad	0.0279***	(0,0063)
<i>Sectores industriales (ref. Otros servicios)</i>		
Comercio	1.166***	(0,035)
Manufactura	0.172***	(0,035)
Minas y canteras	-0.296***	(0,081)
Transporte	-0.0148	(0,056)
Actividades profesionales	-0.210***	(0,049)
Alojamiento	-0.426***	(0,045)
Constante	9.08***	(0,088)
N	7570	
F	284,56(0,0000)	
R ² _{aj.}	0,4419	
Prueba de normalidad		
Skewness	p-valor= 0,0014	
Kurtosis	p-valor= 0,7634	
Prueba Ramsey	5,39(0,0011)	
Mean VIF	1,73	

Nota: Variables con *** son significantes al 1%, con ** son significantes al 5%, y * son significantes al 10%. El error estándar está en el paréntesis. El sector de otros servicios es la categoría de referencia.

El modelo tiene un coeficiente de determinación ajustado de 0,44, lo que significa que las variables independientes explican el 44% de la variabilidad de la productividad laboral. Analizando el estadístico F, se puede determinar que las variables en su conjunto explican a la productividad laboral, pues no se rechaza la hipótesis nula de que los coeficientes son diferentes de cero ($\text{Prob} > F = 0,0000$).

Una vez comprobado que el modelo tiene un buen nivel de ajuste, analizamos la significancia estadística y económica de las variables independientes. El capital humano tiene un impacto positivo y significativo sobre la productividad laboral

de las empresas. Si las empresas aumentan la proporción de empleados con educación terciaria en un punto porcentual, entonces podrían incrementar su productividad en un 1%. El recurso humano capacitado provee a las empresas de conocimiento y eficiencia para la ejecución del trabajo, generando así un incremento en el nivel de productividad (Álvarez et al., 2011; Yang et al. 2010; Yunus et al., 2014).

La inversión en capital fijo tiene un efecto positivo y significativo sobre la productividad laboral. Si esta inversión crece en 1%, entonces la productividad de las empresas podría aumentar en 0,022%. El aumento y las mejoras de capital se traducen en cambios en las prácticas, productos y mejores procedimientos de la empresa, lo cual genera un incremento en el nivel de productividad (Benavente J., 2005; Faruq et al., 2011). La edad de las empresas incide de manera positiva su productividad laboral al 99% de confianza. Se tiene que, por cada año de operación de la empresa, su productividad aumenta en 0,53%. Además, se puede advertir que esta relación no tiene una forma de U invertida, pues el término al cuadrado no es significativo.

El estatus multiplanta tiene un efecto positivo y significativo sobre la productividad laboral de las empresas. Si una empresa es de carácter multiplanta, esta empresa podría incrementar su productividad en un 10,6%. En efecto, las empresas que dividen sus procesos de producción en fases y las localizan en establecimientos separados ubicados en lugares favorables, mejoran su productividad ya que se vuelven más eficientes (Crowley & Mccann, 2015; Rosales, 2018).

El estatus exportador tiene un efecto positivo y significativo sobre la productividad. Si una empresa es exportadora, esta podría incrementar su productividad en un 41,02%. Cuando las empresas operan en mercados internacionales pueden tener ventajas como: una mayor variedad de los bienes intermedios, mejor calidad, difusión del conocimiento, amplificación de los efectos de aprendizaje y aumento del tamaño del mercado (Echavarría, Arbeláez & Rosales, 2006; Álvarez & Gutiérrez, 2011).

Las variables grupo empresarial y capital extranjero, tienen un efecto positivo y significativo sobre la productividad de las empresas. Si las empresas cuentan con capital extranjero pueden incrementar su productividad en un 33,3%, y si forman parte de un grupo empresarial pueden incrementar su productividad en un 27,7%. Las empresas con capital extranjero pueden acceder a recursos tecnológicos por su relación con su casa matriz, mientras que las empresas que pertenecen a un grupo empresarial pueden emprender actividades económicas que no pueden ser mediadas a través del mercado, tal como actividades en finanzas, trabajo y productos (Aldarete et al., 2012; Chong-Sup, 1997; Khanna et al., 2005; Amsden et al., 1994).

El gasto en maquinaria y equipo tiene un efecto negativo en la productividad. Aquellas empresas que registran este tipo de gastos tienen una productividad 0,12% menor que aquellas que no lo tienen. A priori se esperaba un efecto positivo, ya que este tipo de inversión mejoraría la productividad. Una de las razones de este posible resultado es que existe una mayor proporción de empresas que pertenecen al sector de servicios,

las cuales no tienen la necesidad de invertir grandes cantidades en este tipo de inversión (Maquinaria y equipo) sino en otros recursos especializados.

En cuanto a las actividades económicas, el sector comercio y manufactura son más productivos que el sector de servicios, en 116% y 17%, respectivamente. Este hecho puede deberse a que dichos sectores son los que elaboran y comercializan mayor cantidad de productos, por lo que sus niveles de utilidad por trabajador serán mayores. Cuando desagregamos el sector de servicios, se puede comprobar que los servicios de alojamiento y actividades profesionales son menos productivos que el resto de servicios en la economía. Este hecho puede ser explicado por la alta rentabilidad que brinda el sector financiero y que compone gran parte del sector de referencia.

De acuerdo con la teoría, la especialización de los sectores industriales tiene un efecto positivo sobre la productividad mediante las externalidades MAR; sin embargo, para el caso ecuatoriano se muestra un efecto negativo. En otras palabras, la aglomeración de las empresas en una misma industria disminuye la productividad de las empresas. Guevara et al., (2018) y Torrez & Ordoñez (2018) obtienen los mismos resultados y establecen que el efecto de las externalidades de la aglomeración depende del ciclo de vida de la industria. Al parecer, la industria ecuatoriana elabora productos estándar y maduros, para los cuales se mantiene un mismo nivel de productividad. Algunos factores que podrían estar impidiendo la generación de efectos positivos de especialización sobre la productividad son la baja calidad del transporte, infraestructura y bajos niveles de innovación.

La competencia tiene un impacto positivo y significativo sobre la productividad, por lo que un aumento en la competencia local de las empresas conduce a un mayor retorno productivo. La intensidad de la competencia es el determinante más fuerte para la productividad de las empresas, ya que la competencia local lleva a las empresas a innovar o adoptar nuevos procesos de producción más eficientes para mantenerse en el mercado (Porter, 1990; Porter, 1980).

Finalmente, la densidad de las empresas también tiene un efecto positivo y significativo sobre la productividad. Ante el aumento de 1 empresa por kilómetro cuadrado, la productividad puede incrementar en un 2,79%. La proximidad geográfica entre las empresas y empleados favorece y facilita los mecanismos de cooperación, intercambio y aprendizaje (Combes & Gobillon, 2015; Guevara et al. 2018; Ciccone & Hall, 1996; Abel, Dey & Gabe, 2011).

5. CONCLUSIONES

El análisis de los determinantes de la productividad en el Ecuador muestra que las características de las empresas que impulsan en mayor medida la productividad son: el capital humano capacitado, las relaciones con otras empresas a través de un grupo empresarial, la apertura comercial vía exportaciones y la inversión de capital extranjero. Este tipo de factores generan beneficios de productividad como mayor disponibilidad de bienes intermedios, acceso a nuevas tecnologías, asesoría técnica y difusión del conocimiento.

La contribución a la literatura existente es que, además de variables internas a la empresa sobre las cuales ésta tiene control, se consideran factores externos como las economías de aglomeración. Entre los factores relacionados a este último aspecto, la competencia y la densidad de un sector económico impulsan la productividad de las empresas. Por un lado, la competencia obliga a las empresas a adoptar nuevos procesos de producción, para hacerlas más eficientes y permanecer en el mercado. Por otro lado, la densidad favorece los mecanismos de aprendizaje, cooperación e intercambio que influyen positivamente en la productividad. Pese a estos resultados, se encontró que la especialización de un sector tiene un efecto negativo sobre la productividad. Las empresas ecuatorianas no son capaces de absorber dicha externalidad por la estructura de las industrias basada en la producción de productos maduros y estándar.

Para impulsar la productividad de las empresas, en base a los resultados, se recomienda que las empresas se enfoquen en incorporar empleados con altos niveles de educación, pues este tipo de personal posee un dominio de conocimiento más amplio que influiría en la productividad. Además, se debe fomentar la interacción entre empresas en cualquiera de sus formas, ya sea a través de las exportaciones o alianzas en grupos empresariales, para generar nuevos conocimientos e innovación.

En términos contextuales, es recomendable impulsar un entorno de mayor competencia y densidad, puesto que, en este tipo de entorno, las empresas podrían aumentar los niveles de productividad.

Se propone como políticas públicas para estimular la productividad laboral de las empresas ecuatorianas: i) incentivar la formación del capital humano mediante programas de capacitación cofinanciados por el Estado en áreas claves del proceso de producción de la empresa, ii) promover la participación y cooperación de las compañías a través de proyectos de desarrollo conjunto que posean beneficios tributarios y acceso a bajas tasas de interés, y iii) establecer exenciones arancelarias mediante tratados comerciales que faciliten la apertura comercial,

Para finalizar, este estudio se puede extender utilizando la productividad total de factores en vez de la productividad laboral. La primera medida permite considerar la contribución del capital y la tecnología en la producción. En este estudio no se utilizó dicha medida por la limitación de disponibilidad de dicha información en la encuesta de innovación. Sin embargo, se podría recurrir al Censo Económico 2010 que cuenta con dicha información para un solo año. Otra línea de investigación futura es el enfoque en un grupo determinado de empresas, ya sea por sector o por tamaño, para llegar a identificar más específicamente la dinámica de productividad de ciertas empresas.

REFERENCIAS

- Abel, J., Dey, I., & Gabe, T. (2011). Productivity and the Density of Human Capital. *Federal Reserve Bank of New York*.
- Alderete, M., & Gutiérrez, L. (2012). TIC y productividad en las industrias de servicios en Colombia. *Scielo, Lectura de Economía Medellín*, 77: 163-188.
- Álvarez, I., & Gutiérrez, C. (2011). Factores determinantes de la productividad en la industria española de bienes de equipo. *Instituto Complutense de estudios, Madrid*.
- Amsden, A., & Hikino, T. (1994). Project execution capability, organizational know-how and conglomerate corporate growth in late industrialization. *Industrial and Corporate Change*, 3: 111-148.
- Baldwin, J., Brown, M., & Rigby, D. (2008). Agglomeration Economies: Microdata Panel Estimates from Canadian Manufacturing. *Journal of Regional Science*, 50.10.1111/j.1467-9787.2010.00675.x. .
- Benavente, J. (2002). Determinants of Industrial Research and Innovation: The case of Chile. *University of Oxford*, 574.
- Bogetic, Z., & Olusi, O. (2013). Drivers of Firm-Level Productivity in Russia's Manufacturing Sector. *Policy Research Working Paper No. 6572. Washington, DC: World Bank*.
- Carro, R., & Gonzales, D. (2012). Productividad y competitividad. *Universidad Nacional de Mar del Plata- Argentina*.
- Chong-Sup, K. (1997). Los efectos de la apertura comercial y de la inversión extranjera directa en la productividad del sector manufacturero mexicano. *El Trimestre Económico*, 64: 365-390.
- Chudnovsky, D., López, A., & Pupato, G. (2006). Innovation and productivity in developing countries in developing countries: A study of Argentine manufacturing firms 1992-2001. *Research Policy*, 35(2): 266-288. 10.1016/j.respol.2005.10.002
- Ciccone, A., & Hall, R. (1996). Productivity and the Density of Economic Activity. *American Economic Review*, 86(1): 54-70. 10.2307/2118255
- Combes, P. P. (2000). Economic Structure and Local Growth: France, 1984-1993. *Journal of Urban Economics*, 47(3), 329-355.
- Combes, P., & Gobillon, L. (2015). The Empirics of Agglomeration Economies. *Handbook of Urban and Regional Economics*, 5: 247-348.

- Crowley, F., & Mccann, P. (2015). Innovation and Productivity in Irish Firms. *Spatial Economic Analysis*, 10(2): 181-204. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000500175>
- Duranton, G., & Puga, D. (2003). Micro-foundations of urban agglomeration economies. *Handbook of Regional and Urban Economics*, 48: 2063-2117.
- Echavarría, J., Arbeláez, M., & Rosales, M. (2006). La productividad y sus determinantes: El Caso de la Industria Colombiana. *Revista Desarrollo y Sociedad, Universidad de los Andes.*, Disponible en: RePEc:col:000090:003064.
- Faruq, H., & Telaroli, P. (2011). Factors Affecting Manufacturing and Agricultural Productivity Trends among Asian Countries. *ASEAN Economic Bulletin*, 28(1): 45-60. 10.2307/41317191
- Glaeser, E. K. (1992). Growth in cities. *Journal of Political Economy*, 100(6): 1126-1152.
- Guevara, C., Riou, S., & Bernard, C. (2019). Agglomeration externalities in Ecuador: do urbanization and tertiarization matter? *Regional Studies*, 53(5), 706-719. DOI: 10.1080/00343404.2018.1470325
- Guevara, C., S., R., & Autant, C. (2015). Agglomeration externalities and urbanization in Ecuador. *55th of the European Regional Science Association, Lisbon, Portugal.*, <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01212174>.
- Hall, B., Lotti, F., & Mairesse, J. (2009). Innovation and productivity in SMEs: empirical evidence for Italy. *Small Business Economics*, 33:1, 13-33. 10.1007/s11187-009-9184-8
- Harrison, B., Kelley, M., & Gant, J. (1996). . Specialization versus diversity in local economies: the implications for innovative private-sector behaviour. *Journal of Policy Development and Research*, 61-93.
- Jacobs, J. (1969). *The Economies of Cities*. Random House. New York.
- Khanna, T., & Yafeh, Y. (2007). Business Groups in Emerging Markets: Paragons or Parasites? . *Journal of Economic Literature*, 45(2), 331-372. DOI: 10.1257/jel.45.2.331
- López, C., Barcenilla, S., & Mancebon, M. (2008). La productividad total de los factores en los países desarrollados. Componentes y factores determinantes. *Ekonomias*.
- Ludym, J., Luzardo, M., & Rojas, M. (2018). Factores Determinantes de la Productividad Laboral en Pequeñas y Medianas Empresas de Confecciones del Área Metropolitana de Bucaramanga, Colombia. *Información Tecnológica*, 29(5): 175-186.
- Medina, J. (2010). Modelo Integral de productividad, aspectos importantes para su implementación. *Revista Escuela de Adimistración de Negocios*, 69, 110-119.
- Porter, M. (1990). The Competitive Advantage of Nations. *Harvard Bussines Review*.
- Porter, M. (1998). The Competitive Advantage of Nations. *Harvard Business Review*.
- Roper, S., Du, J., & Love, J. (2008). Modelling the innovation value chain. *Research Policy*, 37: 961-977.
- Rosales, F. (2018). Teoría de localización de una planta industrial. *Universidad Mariano Galvez, Guatemala*.
- Silva, A., & Africano, A. P. (2013). ¿Las empresas más productivas se autoseleccionan para exportar? Aplicación de una prueba para el caso de Portugal. *Investigación Económica*, 72(283), 135-161. 10.1016/S0185-1667(13)72589-X
- Torrez, T., & Ordoñez, J. (2019). Agglomeration economies and urban productivity. *REGIÓN*, 6: 17-24.
- Unger, K., Flores, D., & Ibarra, J. (2014). Productividad y capital humano. *El trimestre económico*, 909-941.
- Yang, T. y. (2012). Using a Systematic Organization Change Approach to Improve Productivity and Application with a Case Study on Semiconductor Manufacturing Company. *doi: 10.6220/joq.2012.19(1).03*, 39-58.
- Yunus, N., Said, R., & Law, S. (2014). Do cost of training, education level and R&D investment matter towards influencing labour productivity? *Jurnal Ekonomi Malaysia*, 48(1), 133-142. DOI: 10.17576/JEM-2014-4801-11
- Željko, B., & Olasupo, O. (2013). Drivers of Firm-Level Productivity in Russia's Manufacturing Sector. *World Bank Policy Research Paper Series No. 6572*.

BIOGRAFÍAS



Jonathan Quijia Pillajo, es Ingeniero en Ciencias Económicas y Financieras de la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente se desempeña como investigador independiente. Sus áreas de interés son economía industrial, economía de la innovación y economía del bienestar.

Identificador digital ORCID:
[https://orcid.org/0000-0001-](https://orcid.org/0000-0001-5808-2975)

5808-2975.



Carolina Guevara-Rosero, es Ph.D. en Economía y actualmente es docente del Departamento de Economía Cuantitativa de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés están relacionadas con la Economía de la Innovación, Economía Regional y Urbana y Economía del Bienestar.

Identificador digital ORCID:
[https://orcid.org/0000-0001-](https://orcid.org/0000-0001-7605-1443)

7605-1443.



José Ramírez Álvarez. Maestro en Economía del Desarrollo. Doctor en Economía del Desarrollo. Actualmente es Profesor del Departamento de Economía Cuantitativa de la Escuela Politécnica Nacional y en la Facultad de Economía de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Trabajó como experto tributario en el Servicio de Rentas Internas y analista en el Banco Central de Ecuador.

También ha sido consultor del Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo. Sus áreas de interés son: Microeconomía, Hacienda Pública, Econometría, Optimización, Programación.

Identificador digital ORCID. [https://orcid.org/0000-0001-](https://orcid.org/0000-0001-9624-3549)

9624-3549.

Diseño de un Controlador Predictivo Aplicado a un Convertidor Reductor de Corriente Continua

Medina-Sánchez, Martín ^{1,*} ; Naranjo-Cevallos, Marjorie ² 

¹Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Formación Básica, Quito, Ecuador

²Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Ecuador

Resumen: En el presente artículo, se presenta el diseño de un controlador predictivo (MPC) aplicado a un convertidor reductor de corriente continua. En un principio se muestra el análisis matemático del convertidor reductor y se obtiene su modelo matemático lineal y no lineal, considerando los modos de conducción continua y discontinua del convertidor. Se presenta la metodología para diseñar el controlador predictivo basado en el método de matriz dinámica de control, y para disminuir la carga computacional, se optimiza analíticamente la función de costo del controlador predictivo. Para contrastar los beneficios del control MPC, se propone el diseño de un controlador convencional proporcional, integral y derivativo (PID). Mediante simulación, se evalúa la respuesta transitoria temporal del sistema no lineal de la planta bajo los controladores MPC y PID. Se concluye que la respuesta de la planta con el controlador MPC presenta una respuesta transitoria aceptable y sin error en estado estacionario. Finalmente, se comparan las bondades de cada uno de los dos controladores diseñados.

Palabras clave: Convertidor Reductor, Control Predictivo, PID.

Design of a Predictive Controller Applied to a Direct Current Buck Converter

Abstract: In the present article, the design of a predictive controller (MPC) applied to a buck DC converter is presented. At first, the mathematical analysis of the buck converter is shown and its linear and non-linear mathematical model is obtained, considering the continuous and discontinuous conduction modes of the converter. The methodology to design the predictive controller based on the dynamic matrix control method is presented, and to reduce the computational load, cost function of the predictive controller is analytically optimized. To contrast the benefits of MPC control, the design of a conventional proportional, integral and derivative (PID) controller is proposed. Through simulation, the temporary transient response of the plant non-linear system under the MPC and PID controllers are evaluated. It is concluded that the response of the plant with the MPC controller presents an acceptable transient response and without error in steady state. Finally, the benefits of each of the two designed controllers are compared.

Keywords: Buck converter, Predictive Control, PID.

1. INTRODUCCIÓN

Los convertidores electrónicos de potencia de corriente continua reductores, han sido ampliamente utilizados en aplicaciones donde es necesario reducir la diferencia de potencial de entrada, y presentar a la salida, una diferencia de potencial controlada y dentro de los límites requeridos en las especificaciones de diseño. Existen varios factores que afectan la regulación del voltaje de salida, como, por ejemplo, la variación de la resistencia de carga debido al aumento de la temperatura, la conmutación de dispositivos electrónicos no ideales, entre otros (Hart, 2001). Es por ello, que los convertidores reductores se han convertido en un tema de

creciente estudio desde el punto de vista del control automático.

Se han propuesto varias técnicas, tanto del modelado matemático dinámico, como de algoritmos de control. El problema del modelado dinámico radica en que la estructura del controlador cambia debido a la conmutación de dispositivos electrónicos, lo que genera una dinámica no lineal del proceso. Existen múltiples formas de abordar el problema del modelado matemático, el modelo más extendido es el modelo promedio de pequeña señal o modelo lineal (Oliva et al.2006), pero también existen otros modelos como el modelo no lineal, reducido, he incluso modelos basados en lógica difusa (Cervantes et al., 2015). El modelo promedio de

*martin.medina@epn.edu.ec

Recibido: 10/08/2020

Aceptado: 06/01/2021

Publicado: 28/02/2021

10.33333/rp.vol47n1.03

CC BY 4.0

pequeña señal presenta una dinámica de segundo orden, lo que provoca la presencia de sobreimpulsos y un gran tiempo de establecimiento de la diferencia de potencial de salida, frente a entradas del tipo escalón. Se debe destacar que la dinámica de segundo orden puede provocar que el convertidor opere en forma discontinua, análisis que no es abordado en la mayoría de trabajos presentados hasta la fecha.

Por otro lado, la estrategia de control debe lidiar con problemas como restricciones en la señal de control y tiempos de procesamiento muy cortos. La carga computacional del controlador debe ser resuelta en intervalos de tiempos, en general, del orden de los milisegundos (Liu et al., 2013). Existen trabajos que abordan técnicas complejas de control, como el control fractal (Rodríguez et al., 2020), pero que en la actualidad aún no pueden implementarse en línea. Sin embargo, el desarrollo de rápidos microprocesadores ha hecho que cada vez sea mayor la factibilidad de implementar en línea técnicas de control avanzado, como el control adaptativo (Medina et al., n.d.) y el control predictivo (Gaouzi et al., 2018).

El control predictivo basado en modelo ha sido una técnica de control avanzado ampliamente utilizado en la industria, y ha despertado en los últimos años un creciente interés, tanto en su desarrollo teórico como en la implementación práctica (Rodríguez y Cortes, 2012). El controlador predictivo hace uso de un modelo matemático para predecir las salidas futuras de la planta, y la señal de control se obtiene de tal manera que minimiza una función de costo. En cada instante de muestreo se aplica la primera señal de control calculada y se desecha el resto, todo el procedimiento se vuelve a repetir en el siguiente instante de muestreo. Una metodología más detallada se puede encontrar en Camacho y Bordons (2007).

Para minimizar la función de costo, es común utilizar algoritmos recursivos que realizan una optimización numérica. Esto implica aumentar considerablemente el tiempo de ejecución del programa, y como consecuencia, lo vuelve imposible de aplicarse en línea por las restricciones temporales propias del convertidor reductor. Para evitar este inconveniente, la minimización de la función de costo debe ser analítica, y el horizonte de predicción lo más corto posible sin que se genere inestabilidad (Liu et al., 2013). Bajo estas condiciones, el control predictivo resulta una buena solución para el problema de controlar la planta del convertidor reductor, como se puede observar en Aliaga et al. (2019), Manjari y Majhi (2007) y Varaskar y Divya (2017).

En el presente trabajo, mediante simulación, se pretende dar solución a la problemática desarrollando un controlador predictivo usando el método de matriz de control dinámica y una minimización de la función de costo analítica. Se ajustarán los parámetros del controlador predictivo para tener una respuesta temporal aceptable y asegurar el modo de conducción continua del convertidor. Para contrastar los beneficios del controlador predictivo con un controlador convencional, se propone diseñar un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) y comparar sus respuestas temporales transitorias.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se obtiene el modelo matemático del convertidor reductor, se diseña el controlador predictivo en la sección 3, en la sección 4 se diseña el controlador PID, los resultados obtenidos mediante simulación se presentan en la sección 5, y en la sección 6 se resumen las conclusiones del trabajo planteado.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL CONVERTIDOR REDUCTOR

El convertidor reductor de corriente continua es un dispositivo electrónico formado por un filtro pasabajos $L - C$ en la salida, como se muestra en la Figura 1. El convertidor tiene como objetivo presentar en la salida una diferencia de potencial (V_o) menor que la diferencia de potencial de la entrada (V_s). El interruptor controlado (Q) se cierra de forma periódica un ciclo de trabajo d , mismo que toma valores entre 0 y 1. Cuando Q cierra, el diodo (D) se polariza en inversa y (V_s) suministra energía al filtro formado por un inductor (L) y un capacitor (C). Cuando Q se abre, el diodo se polariza en directa, y la corriente almacenada en el inductor y capacitor fluye hasta el resistor R . Debido a que los componentes no son ideales, la resistencia r representa la resistencia del inductor y la resistencia del dispositivo de conmutación Q .

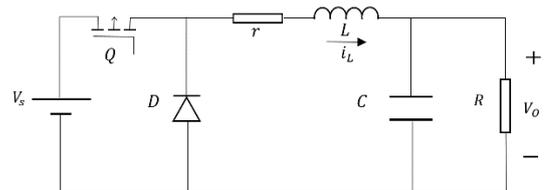


Figura 1. Convertidor reductor de corriente continua

2.1 Modelo no lineal

Para el análisis dinámico del convertidor se debe tomar en cuenta que el convertidor puede funcionar en forma continua o discontinua (Han et al., 2014). Primero se supondrá que la corriente en el inductor i_L es permanente, esto es, siempre positiva. Por simplicidad, se considerará que D es ideal. Si se considera el conmutador cerrado, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} -V_s + i_L r + L \frac{di_L}{dt} + V_o &= 0 \\ C \frac{dV_o}{dt} &= i_L - \frac{V_o}{R} \end{aligned} \quad (1)$$

Si se considera i_L y V_o como las variables de estado x_1 y x_2 respectivamente, V_s como u , se obtiene el siguiente modelo en el espacio de estados:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u \\ Y &= [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

El sistema en la Ecuación (2) se puede escribir como:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{B}_1 u \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{Cx}\end{aligned}\quad (3)$$

Cuando el interruptor se abre, el diodo se polariza en directa, se pueden obtener las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned}i_L r + L \frac{di_L}{dt} + V_o &= 0 \\ C \frac{dV_o}{dt} &= i_L - \frac{V_o}{R}\end{aligned}\quad (4)$$

La representación en el espacio de estados del sistema de la Ecuación (4) se observa en la Ecuación (5).

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ Y &= [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (5)$$

El sistema de la Ecuación (5) se puede escribir como:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{B}_2 u \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{Cx}\end{aligned}\quad (6)$$

En el transcurso del tiempo el interruptor se cierra y abre, conmutando entre los sistemas de la Ecuación (3) y Ecuación (6). Para la representación del sistema no lineal se puede unificar las ecuaciones mencionadas anteriormente como sigue:

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{Ax} + \mathbf{B}_1 u)n + (\mathbf{Ax} + \mathbf{B}_2 u)(1-n) \quad (7)$$

Donde n toma valores discretos, 1 cuando el interruptor está cerrado y 0 cuando está abierto. A partir del modelo en la Ecuación (7) se puede escribir el modelo reducido, agrupando los términos comunes:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{B}_2 u + ((\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2)u)n \quad (8)$$

Como \mathbf{B}_2 es un vector de ceros, el sistema finalmente se puede representar como:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{B}_1 u n \quad (9)$$

Cuando el convertidor funciona en forma discontinua, esto es, cuando $i_L = 0$, las ecuaciones de estado son:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (10)$$

2.2 Modelo lineal

El modelo lineal del convertidor reductor es el modelo promedio de pequeña señal (Erickson y Maksimović, 2020). Este modelo simplificado no toma en cuenta el funcionamiento del convertidor en forma discontinua. El modelo se puede expresar como:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} du \\ \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{B}_1 du\end{aligned}\quad (11)$$

Donde d es el ciclo de trabajo.

2.3 Respuesta al escalón

En la Tabla 1 se muestran los valores de R, C, L, r, V_s usados en la simulación del convertidor. Los valores fueron calculados de tal manera que el convertidor funcione en forma continua en estado estacionario (Hart, 2001).

Tabla 1. Valores de los elementos del convertidor reductor

Elemento	Valor
C	1,7E - 03 (F)
L	1,12E - 03 (H)
r	0,18 (Ω)
V_s	12 (V)
R	5 (Ω)

En la Figura 2, se compara la respuesta al escalón del modelo lineal y no lineal cuando la frecuencia de conmutación del interruptor es de 3 kHz. Cuando el cambio en el punto de consigna es relativamente grande, el convertidor puede llegar a funcionar en forma discontinua, debido a que la corriente en el inductor toma un valor de cero y la dinámica del sistema se comporta como la Ecuación (10). Dicho comportamiento no se ve reflejado en el modelo lineal, debido a que este modelo no tiene restricciones para corrientes en el inductor iguales o menores a cero. Cuando el cambio del punto de trabajo es relativamente pequeño, el modelo lineal y no lineal presentan respuestas idénticas.

Para el diseño de los controladores predictivo y PID se utilizará el modelo lineal del convertidor, debido a su simplicidad matemática y su buena caracterización de la dinámica del controlador cuando el convertidor funciona en forma continua.

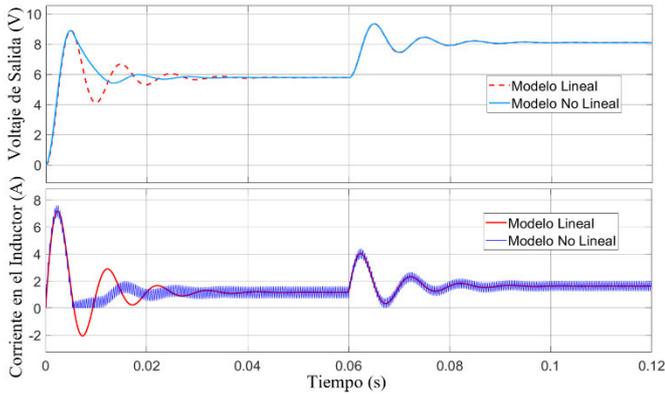


Figura 2. Respuesta al escalón del modelo lineal y no lineal del convertidor reductor

2.4 Función de transferencia

A partir del modelo lineal de la Ecuación (11), es posible establecer la función de transferencia del convertidor reductor, de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{dV_s(s)} = [C(sI - A)^{-1}B] \quad (12)$$

$$\frac{V_o(s)}{dV_s(s)} = \frac{R}{RLCs^2 + (L + rRC)s + r + R} \quad (13)$$

Reemplazando los valores de la Tabla 1, se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{V_o(s)}{dV_s(s)} = \frac{4,058E+05}{s^2 + 251,6s + 4,205E+05} \quad (14)$$

$$\frac{V_o(s)}{dV_s(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (15)$$

Si la función de transferencia, se compara con la forma canónica de una función de transferencia de segundo orden (Ecuación (15)), se obtiene que la frecuencia angular natural de la planta es $\omega_n = 648,46$ rad/s, el factor de amortiguamiento relativo $\xi = 0,19$ y la ganancia del sistema $k = 0,965$. Debido a que el controlador predictivo requiere del modelo de la planta en tiempo discreto, será necesario discretizar la planta de la Ecuación (14). Para escoger el periodo de muestreo se tomará en cuenta el criterio descrito por Ogata (1996), donde la frecuencia de muestreo debe ser como mínimo 10 veces en ancho de banda de la función de transferencia del convertidor. La función de transferencia en tiempo discreto se muestra en la Ecuación (16).

$$G(z) = \frac{0,07938z + 0,07516}{z^2 - 1,69z + 0,8497}; T_s = 647,1E - 6s \quad (16)$$

3. DISEÑO DEL CONTROLADOR PREDICTIVO

El método del controlador predictivo desarrollado en el presente trabajo será el método de matriz de control dinámica, DMC de ahora en adelante, propuesto por Cutler y Ramaker (1980). El rendimiento del controlador DMC depende de la

calidad del modelo matemático escogido para la predicción de la planta, es por esto que en el presente trabajo se presentará un estudio detallado de la predicción de la planta. Para la obtención de la ley de control, se debe minimizar una función de costo, debe tomarse en cuenta que la minimización de la función de costo debe ser analítica, más no recursiva, es por ello que en la función de costo no se considerarán restricciones en la salida de control. Para la salida del controlador a la planta, se considera el primer valor calculado en la ley de control, y el proceso se vuelve a repetir.

3.1 Modelo de Predicción

En el método del control DM, el modelo de predicción utiliza los valores g_i , resultado de muestrear la respuesta de la planta frente a una entrada del tipo escalón unitario. La predicción de la planta al instante t , se obtiene como:

$$y(t/t) = \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t-i) \quad (17)$$

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$$

La entrada de la planta al instante t se representa como $u(t)$. El valor de la predicción de la planta para el instante $t+k$, calculado en el instante t , $y(t+k/t)$ es:

$$y(t+k/t) = \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t+k-i/t) + n(t+k/t) \quad (18)$$

Donde $n(t+k/t)$ representa la predicción de las perturbaciones para el instante $t+k$, calculado en el instante t . El valor de $n(t/t)$ se puede obtener como:

$$n(t/t) = y_m(t) - y(t/t)$$

$$n(t/t) = y_m(t) - \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t-i) \quad (19)$$

Donde $y_m(t)$ es la salida de la planta medida en el instante t . La predicción de las perturbaciones se expresa como:

$$n(t+k/t) = n(t/t) = cte \quad (20)$$

Si se desarrolla el sumatorio de la Ecuación (18) se pueden distinguir las acciones de control futuras, cuando $k-i \geq 0$, y acciones de control pasadas, cuando $k-i < 0$.

$$y(t+k/t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i/t) + \sum_{i=k+1}^N g_i \Delta u(t+k-i/t) + n(t/t) \quad (21)$$

La respuesta debida a las acciones pasadas de control se denomina respuesta libre del proceso. Considerando la predicción de las perturbaciones, la respuesta libre se obtiene como:

$$f(t+k/t) = y_m(t) + \sum_{i=1}^{N-k} g_{k+i} \Delta u(t-i) - \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t-i) \quad (22)$$

La respuesta debida a las acciones futuras de control se denomina respuesta forzada del proceso:

$$y_f(t+k/t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i/t) \quad (23)$$

Finalmente, la Ecuación (18) puede escribirse de forma compacta como:

$$y(t+k/t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i/t) + f(t+k/t) \quad (24)$$

Si se desarrolla la Ecuación (24) a lo largo del horizonte de predicción p ($k=1,2,\dots,p$):

$$\begin{bmatrix} y(t+1/t) \\ y(t+2/t) \\ \vdots \\ y(t+p/t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_p & g_{p-1} & \dots & g_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(t+1/t) \\ \Delta u(t+2/t) \\ \vdots \\ \Delta u(t+p/t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f(t+1/t) \\ f(t+2/t) \\ \vdots \\ f(t+p/t) \end{bmatrix} \quad (25)$$

La Ecuación (25) se puede representar como:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G}\Delta\mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (26)$$

3.2 Función de costo y acción de control

El control predictivo tiene como objetivo alcanzar una señal de referencia $r(t+i/t)$, para ello se formula una función de costo que tenga presente el error de seguimiento, así como también el esfuerzo de control. La función de costo a minimizar se propone como:

$$J = \delta \sum_{i=1}^p [y(t+i/t) - r(t+i/t)]^2 + \lambda \sum_{i=1}^m [\Delta u(t+i-1)]^2 \quad (27)$$

Donde m define el horizonte de control, δ y λ son constantes que penalizan el error de seguimiento y acción de control respectivamente. Los valores de dichas constantes se pueden utilizar como parámetros para sintonizar el controlador predictivo. A continuación, se presentará un método analítico para minimizar la función de costo. La Ecuación (27) se puede expresar como:

$$J = \delta \sum_{i=1}^p e_i^2 + \lambda \sum_{i=1}^m [\Delta u(t+i-1)]^2 \quad (28)$$

Donde e_i es el i -ésimo error de seguimiento. La Ecuación (28) se puede escribir de forma matricial:

$$J = \delta \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \lambda \Delta \mathbf{u}^T \Delta \mathbf{u} \quad (29)$$

Para minimizar la función de costo, es necesario que:

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta \mathbf{u}} = 0 \quad (30)$$

Si se expresa \mathbf{e} en función de la acción de control y la predicción de la planta de la Ecuación (26):

$$\mathbf{e} = (\mathbf{G}\Delta\mathbf{u} + \mathbf{f} - \mathbf{r}) \quad (31)$$

El resultado de minimizar la Ecuación (29) es:

$$\Delta \mathbf{u} = \delta (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{r} - \mathbf{f}) \quad (32)$$

Debido a que el producto de $(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T$ será siempre una constante, para minimizar la carga computacional se debe calcular una sola vez al inicio. Hay que destacar que, para obtener la ley de control, es necesario y suficiente la predicción de la respuesta libre del proceso. La salida del controlador hacia la planta se expresa en función del primer valor del vector $\Delta \mathbf{u}$, Δu_1 :

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u_1 \quad (33)$$

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR PID

Para el diseño del controlador PID, se tomará en cuenta la metodología de diseño basado en la cancelación de polos y ceros presentada en Astrom y Häggglund (2009) y llevada a la práctica en Medina et al. (n.d.) para convertidores reductores. Éste método se basa en el análisis del lugar geométrico de las raíces, y tiene por objetivo cancelar los polos que provocan una dinámica no deseada en la planta. El método es posible implementarlo en plantas estables de fase mínima.

Debido a que la dinámica del modelo lineal del convertidor es de segundo orden (Ecuación (15)), se propone el siguiente controlador PID en el dominio complejo s :

$$PID(s) = \left(\frac{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{k\omega_n^2} \right) \left(\frac{1}{\tau s} \right) \quad (34)$$

La función de transferencia en lazo cerrado del controlador PID en serie con la función de transferencia en la Ecuación (15) es:

$$G_{LC}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (35)$$

Se puede observar que la planta de segundo orden se ha reducido a una planta de primer orden gracias al controlador PID, donde τ es la constante de tiempo deseada de la respuesta de la planta en lazo cerrado. Si se compara la Ecuación (34) con la ecuación canónica del controlador PID:

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (36)$$

Se obtiene que:

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{2\xi}{k\omega_n\tau} \\ K_i &= \frac{1}{k\tau} \\ K_d &= \frac{1}{k\omega_n^2\tau} \end{aligned} \quad (37)$$

Donde K_p , K_i y K_d son las constantes proporcional, integral y derivativa respectivamente del controlador PID. Para discretizar el controlador PID, mediante simulación, se ha determinado que el mejor rendimiento del controlador se alcanza con el método de discretización de Euler en adelanto para el término derivativo y Euler en atraso para el término integral. El controlador PID queda expresado en función del dominio complejo z y el tiempo de muestreo T_s :

$$PID(z) = K_p + K_i T_s \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} + K_d \frac{1-z^{-1}}{T_s} \quad (38)$$

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante simulación utilizando el software de MATLAB. Los controladores fueron sometidos a una señal de referencia del tipo escalón, en un principio la señal de referencia fue de 8,0 V y luego de 1,6 V.

Uno de los objetivos del presente trabajo fue obtener un controlador predictivo que pueda ser implementado en línea, por lo que, arbitrariamente se escogió el horizonte de predicción igual a cuatro, esto para disminuir la carga computacional. Los valores de la matriz \mathbf{G} quedan como sigue:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,090 & 0 & 0 & 0 \\ 0,943 & 0,090 & 0 & 0 \\ 2,316 & 0,943 & 0,090 & 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

Para sintonizar el controlador MPC, se mantuvo el valor de $\delta = 1$ y se aumentó gradualmente el valor de λ . Conforme λ aumenta se penaliza la acción de control y la estabilidad relativa de la respuesta al escalón se incrementa, pero aumenta el tiempo de establecimiento, como se observa en la Figura 3. Se establece que el valor de $\lambda = 85$ cumple de mejor forma el compromiso de estabilidad relativa y tiempo de respuesta.

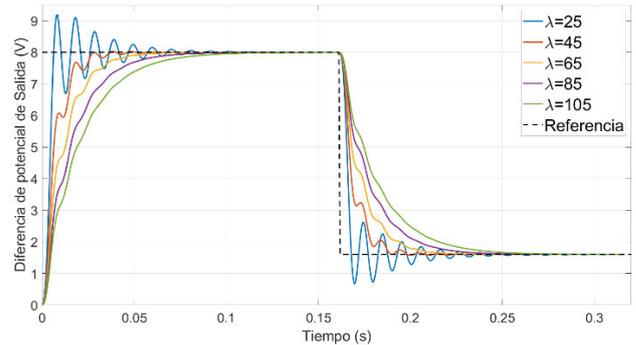


Figura 3. Voltaje de salida según el valor de λ

El comportamiento de la corriente media en el inductor se observa en la Figura 4. Conforme aumenta la estabilidad relativa, la corriente en el inductor evita el funcionamiento en modo discontinuo de la fuente reductora, debido a que la corriente en el inductor se mantiene mayor a cero.

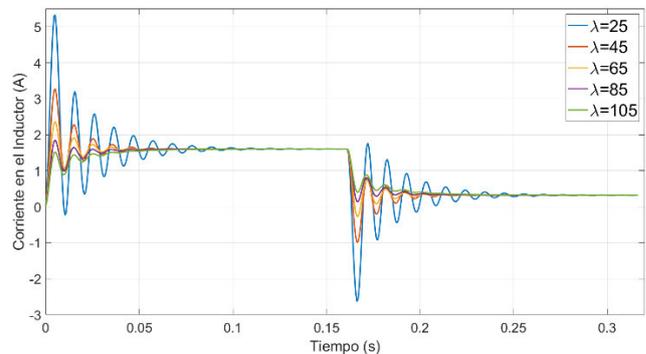


Figura 4. Corriente media en el inductor según el valor de λ

Para el diseño del controlador PID, se fijó como requisito de diseño una respuesta temporal sin sobreimpulsos y un tiempo de establecimiento de 20 ms. Utilizando el método descrito en la sección 3 se obtuvo los parámetros del controlador PID, que en un principio, no mostraron una respuesta al escalón favorable. Se necesitó de una sintonización fina de los parámetros, quedando finalmente como: $K_p = 0,245$, $K_i = 200$, $K_d = 1E-3$.

Debido a que el modelo no lineal de la planta reproduce con mayor aproximación la dinámica real de la planta respecto al modelo lineal, en la Figura 5 se presenta la respuesta temporal del modelo no lineal con los dos controladores propuestos. La frecuencia de conmutación del interruptor controlado es de $f = 30$ kHz.

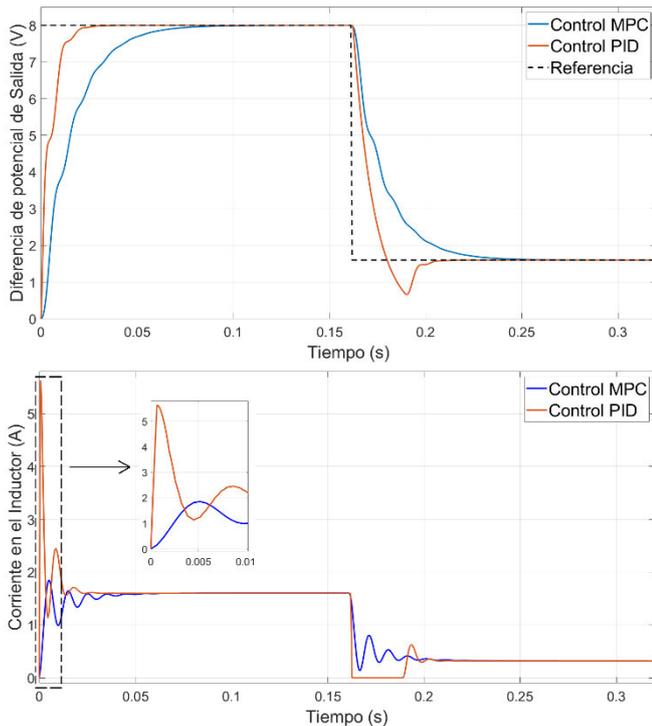


Figura 5. Respuesta del modelo no lineal con los controladores PID y MPC

Cuando el punto de consigna es de 8,0 V, la respuesta de la diferencia de potencial de salida de la planta con el controlador PID presenta un tiempo de asentamiento de 18 ms, sin sobreimpulso. El pico de corriente en el inductor es 3,5 veces la corriente en estado estacionario, aspecto que se debe considerar para dimensionar el inductor. Cuando se da el cambio del punto de consigna a 1,6 V, el tiempo de establecimiento crece a 20 ms, y la respuesta presenta un sobreimpulso del 72%, debido a que la fuente reductora entra en modo discontinuo.

La respuesta de la planta con el controlador MPC no difiere de la obtenida con el modelo lineal, esto porque la corriente en el inductor se mantiene siempre positiva. El tiempo de establecimiento es de 53 ms sin sobreimpulso, cuando el punto de consigna es 8,0 V y 56 ms cuando es 1,6 V. El pico de corriente en el inductor es de 1,15 veces la corriente en estado estacionario.

El error en estado estacionario es cero en los dos controladores.

6. CONCLUSIONES

El modelo lineal del convertidor reductor no revela el comportamiento de la planta cuando la corriente en el inductor se reduce a cero, aspecto que se debe tener en cuenta en la fase de diseño de un controlador. El modelo lineal fue usado en la fase de diseño de los controladores MPC y PID, sin embargo, el rendimiento de éstos últimos fue evaluado con el modelo no lineal, debido a que éste refleja con mayor aproximación la dinámica real de la planta.

Para implementar el controlador MPC basado en el método de matriz de control dinámica, basta con proyectar la respuesta libre del sistema, y el horizonte de predicción puede ser seleccionado de forma arbitraria en función de reducir la carga computacional. La respuesta temporal del modelo no lineal de

la planta con el controlador MPC fue capaz de seguir satisfactoriamente la trayectoria de referencia. La respuesta al escalón no posee sobreimpulso, pero en contrapartida presenta un tiempo de asentamiento mayor comparado con la respuesta de la planta bajo el controlador PID. Resulta muy sencillo sintonizar el controlador MPC, basta con aumentar gradualmente el valor de λ hasta que se cumpla con los requisitos de estabilidad relativa y tiempo de establecimiento.

El método de diseño propuesto en el presente trabajo para obtener las constantes del controlador del controlador PID, dio una primera aproximación a los valores de K_p , K_i y K_d , pero requirió de una sintonización fina de los mismos. Modificar los valores de las constantes del controlador PID requiere de cierto conocimiento de los efectos de las constantes en la respuesta transitoria, no sucede lo mismo con el controlador MPC, que presenta un método más intuitivo de sintonización.

El controlador PID presenta un menor tiempo de asentamiento, pero esto provoca picos de corriente relativamente grandes comparados con el control MPC, que deberán ser tomados en cuenta para dimensionar el inductor y el elemento de conmutación. Si el cambio del punto de consigna es relativamente grande, la fuente bajo el control PID puede funcionar en forma discontinua y generar sobreimpulsos considerables, que no pueden ser predichos en la fase de diseño utilizando el modelo lineal de la planta.

La respuesta en estado estacionario presenta un error de posición nulo en los dos casos, por lo que los dos controladores son capaces de eliminar el error en estado estacionario.

REFERENCIAS

- Aliaga, R., Munoz, J., Rojas, D., Villalon, A., Troncoso, J., y Gaisse, P. (2019). Predictive Control of a Buck Converter for Photovoltaic Energy: An Experimental Implementation. *IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2019*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CHILECON47746.2019.8988046>
- Astrom, K., y Hägglund, T. (2009). *Control PID avanzado*. Madrid, España: Pearson Educación.
- Camacho, E., y Bordons, C. (2007). *Model Predictive control*. Londres, Inglaterra: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-398-5>
- Cervantes, M. H., Montiel, M. F., Marin, J. A., Anguiano, A. C. T., y Ramirez, M. C. G. (2015). Takagi-Sugeno fuzzy model for DC-DC converters. *2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2015.7395109>
- Cutler, C., y Ramaker, B. (1980). Dynamic Matrix Control-a Computer Control Algorithm. *Automatic Control Conference*. 25(3), 335–348.
- Erickson, R. W., y Maksimović, D. (2020). *Fundamentals of Power Electronics*. Cham, Suiza: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4>
- Gaouzi, K., El Fadil, H., Rachid, A., Belhaj, F. Z., y Giri, F. (2018). Constrained model predictive control for DC-

BIOGRAFÍAS

- DC buck power converters. *Proceedings of 2017 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EITech.2017.8255245>
- Han, J., Zhang, B., Qiu, D., y Ma, H. (2014). A global modeling method of buck converter in discontinuous conduction mode. *Proceedings - 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition*. 232–237. <https://doi.org/10.1109/PEAC.2014.7037860>
- Hart, D. (2001). *Electrónica de potencia* (1st ed.). Madrid, España: Pearson Education.
- Liu, K. Z., Yokozawa, Y., Katane, T., y Nakagawa, T. (2013). An MPC-PI approach for buck DC-DC converters and its implementation. *IEEJ Transactions on Industry Applications*. 133(8), 171–176. <https://doi.org/10.1541/ieejias.133.838>
- Manjari, K., y Majhi, S. (2007). Model Predictive Control of Single-Inductor Dual-Output Buck Converter. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. 20(2), 114–125. <https://doi.org/10.1109/TSM.2007.895203>
- Medina, M., Narajo, M., y Rodríguez, J. (n.d.). Comparación del desempeño de un controlador adaptativo por modelo de referencia y un PID clásico para el control de un convertidor DC-DC reductor. Obtenido https://www.academia.edu/43823500/Comparaci%C3%B3n_del_desempe%C3%B1o_de_un_controlador_adaptativo_por_modelo_de_referencia_y_un_PID_cl%C3%A1sico_para_el_control_de_un_convertidor_DC_DC_reductor?source=swp_shar (Mayo, 2020)
- Ogata, K. (1996). *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Mexico, Mexico: Prentice Hall Hispanoamericana Inc.
- Oliva, A. R., Ang, S. S., y Bortolotto, G. E. (2006). Digital control of a voltage-mode synchronous buck converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 21(1), 157–163. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2005.861193>
- Rodríguez, J., y Cortes, P. (2012). *Model Predictive Control. Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119941446.ch3>
- Rodríguez, J., Herrera, V., Morocho, A., & Merino, C. (2020). Fractal Control Design with Anti-windup Effect for Optimal Operation of a Power Flyback Source. *Advances and Applications in Computer Science, Electronics and Industrial Engineering*. 1078(1), 308–328. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33614-1_21
- Varaskar, S., y Divya, M. (2017). Interleaved buck converter with low output current ripple using Model Predictive algorithm. *Proceedings of 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*. 1–6. <https://doi.org/10.1109/GET.2016.7916704>



Martín Damián Medina Sánchez. Ingeniero en electrónica y control (2015) y magister en sistemas de control y automatización industrial (2017). A lo largo de sus estudios de grado participa en varios concursos de robótica obteniendo alrededor de 10 primeros lugares a nivel nacional y una participación en un concurso internacional. Merecedor de varios reconocimientos al mérito académico, entre ellos, mejor graduado de la carrera de ingeniería electrónica. Actualmente se desempeña como docente en el Departamento de Formación Básica de la Escuela Politécnica Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2158-7202>



Marjorie Carolina Naranjo Cevallos. Ingeniera Electrónica en control y redes Industriales graduada en 2019, ha participado en concursos nacionales de robótica obteniendo los primeros lugares desde el 2013 hasta el 2015. Fue becaria dos años en su carrera de grado por distinción académica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7654-1757>

Estudio de la Influencia de los Parámetros Operativos sobre las Emisiones de un Horno Túnel para Materiales Cerámicos

Sotalín, Daniel ¹ ; Montenegro, Lucía ² ; Cabrera, Marcelo ^{3,*} 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Quito, Ecuador

²Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

³Universidad Internacional del Ecuador, Escuela de Gestión Ambiental, Quito, Ecuador

Resumen: En esta investigación se analizó la influencia de los parámetros operativos de un horno túnel para cerámica de una industria ecuatoriana, en la emisión de gases a la atmósfera. El diagnóstico inicial consistió en la medición de los parámetros de temperatura, presión interna, concentración de oxígeno y consumo de combustible del horno túnel, posteriormente se realizaron los balances de masa y energía y a continuación se determinó la relación combustible-aire teórico por galón de diésel. Se identificó que el flujo másico de aire de ingreso al horno (5,83 kg/s) fue menor que el de salida (9,89 kg/s) y que la relación combustible-aire fue de 1 200 ft³ de aire por galón de diésel. Considerando un exceso de aire del 20 % se reguló el flujo de aire que ingresa a los quemadores y se determinaron las condiciones óptimas para la combustión. Bajo los nuevos parámetros establecidos, se evidenció una reducción del 22 % en la concentración de monóxido de carbono (CO) y del 1,5 % en la concentración de oxígeno (O₂) presente en la chimenea, sin embargo, los valores alcanzados aun no cumplen con la normativa ambiental del país. Se concluyó que la inducción del aire exterior, fuente abierta, y la relación combustible-aire son los parámetros operativos que más influencia tienen en las emisiones del horno túnel para materiales cerámicos. Además, que el control sistemático de la concentración de oxígeno, mediante la calibración de los quemadores, permite reducir en un 22 % las emisiones de monóxido de carbono y en 1.5 % la concentración de oxígeno, sin afectar la calidad del producto.

Palabras clave: horno túnel cerámica, emisiones a la atmósfera, monóxido de carbono, oxígeno.

Study of the Influence of the Operational Parameters on the Emissions of a Tunnel Kiln for Ceramic Materials

Abstract: In this investigation we analyzed how the operational parameters of a tunnel kiln for ceramic tile of an Ecuadorian industry influenced on the emission of gases to the atmosphere. The initial diagnosis consisted on the measurements of temperature, the oven internal pressure, oxygen concentration, and fuel consumption. Subsequently, we made a balance between mass and energy, thus we were able to determine the theoretical relationship of fuel and air per gallon of diesel. We were able to identify that the air mass fluid entering the oven (5.83 kg/s) was less than the air leaving (9.89 kg/s), and also that the consumption between fuel and air was 1200ft³ of air per gallon of diesel. Considering a 20% of air excess, we regulated the inlet air that goes to the oven burners, so we can determine the optimum conditions for combustion. Under this new setting, we were able to see a 22% reduction of CO concentration and 1,5% oxygen concentration in the oven exhaust fans. Nevertheless, these percentages do not meet the country's Ambiental normative. We concluded that the inlet air to the oven and the fuel-air relationship are the most influential on the oven emissions for ceramic tile. Additionally, that throughout the calibration of the burners we are able to reduce by 22% the CO emissions and on 1,5% the oxygen concentration without causing harm to the final product

Keywords: Ceramic tunnel kiln, Emissions to the atmosphere, carbon monoxide, Oxygen.

1. INTRODUCCIÓN

La preservación del medio ambiente es uno de los desafíos más importantes en la actualidad para el sector industrial. En el sector de la fabricación de productos cerámicos, las emisiones

de gases contaminantes al aire son uno de los aspectos ambientales más significativos (CAR/PL, 2006, p. 126).

En el proceso de cocción, dependiendo del tamaño del horno, las condiciones de operación, el estado de las instalaciones, el

*marcelo.cabrera@epn.edu.ec

Recibido: 17/01/2020

Aceptado: 06/01/2021

Publicado: 28/02/2021

10.33333/rp.vol47n1.04

CC BY 4.0

combustible y la eficiencia de la combustión será el nivel de contaminación producido (Güeto, 2005, p. 337).

El proceso de fabricación de productos cerámicos requiere una gran cantidad de energía térmica para el secado y cocción de las piezas, esta energía es producida en los quemadores a través de la combustión de un combustible que genera grandes cantidades de gases contaminantes que deterioran la calidad del aire (Mezquita y Monfort, 2010, p. 304).

De acuerdo con Montfort et al. (2014), los hornos industriales cerámicos de túnel y canales han sido los equipos más usados en el proceso de secado, sin embargo, con objeto de reducir el consumo energético y mejorar el proceso, se han sustituido estos equipos por uno de rodillos, el cual usa como combustible (p. 113).

La normativa ambiental en Ecuador utiliza una concentración de oxígeno referencial del 7 %, para la corrección de concentración de contaminantes por el factor de dilución, valor que no se considera aplicable a este tipo de hornos que son abiertos y que tienen concentraciones altas de oxígeno en la chimenea, por la cantidad de aire que se induce del exterior (Ministerio del Ambiente, 2015).

Una empresa ecuatoriana dedicada a la fabricación de sanitarios, lavamanos, urinarios y bidets, para su proceso de cocción cuenta con 4 hornos continuos o túneles y 3 hornos batch, los cuales desde el año 2005 no cumplen con los límites permisibles de emisiones al aire de acuerdo con la normativa ambiental vigente, en lo que se refiere a la concentración de monóxido de carbono (CO). Los valores promedio de las emisiones de monóxido de carbono (CO) son de 571,99 mg/m³ corregidos al 7 % de oxígeno a condiciones normales, cuyo valor es superior al valor norma que es 250 mg/m³ (Municipio D.M. Quito, 2016).

En consecuencia, en este trabajo se evaluará la influencia de los parámetros operativos sobre las emisiones de un horno tipo túnel utilizado para la cocción de materiales cerámicos, a partir del desempeño inicial del horno y la determinación de la relación combustible/aire para los quemadores, a fin de reducir las emisiones de monóxido de carbono y la concentración de oxígeno, sin afectar la calidad de los productos cerámicos.

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Evaluación inicial de operación del horno

Las emisiones que se generan en el horno y salen a través de la chimenea, son producto de la combustión del diésel, que se realiza en sus quemadores y dependen principalmente de la relación combustible/aire y de parámetros del proceso de cocción tales como la temperatura, concentración de oxígeno, presión interna y consumo de combustible. Debido a esto, se realizó la evaluación inicial del horno tipo túnel con el que cuenta la empresa mediante el análisis de los parámetros de cocción y la identificación de las partes estructurales, zonas y dimensiones del equipo (Blanco, 2013; Espinosa, 2010). Para cada parámetro se realizaron mediciones diarias por 30 días y se analizó la influencia de éstos sobre las emisiones del horno. Los instrumentos usados para tomar las mediciones son

propios del horno y son calibrados semestralmente como parte de los requerimientos del sistema de gestión de calidad de la empresa con lo que se garantiza la fiabilidad de los datos obtenidos.

Para determinar la curva de temperatura que describe el proceso cocción se realizaron mediciones en las 23 termocuplas que se encuentran instaladas a lo largo del horno y que están conectadas a un PLC para el control. La curva de presión interna se determinó mediante mediciones en las 20 tomas ubicadas en las paredes laterales a lo largo del horno. La concentración de oxígeno o tipo de atmósfera del horno, como se le conoce, es otro de los parámetros que se analizó. Para la construcción de la curva de concentración de oxígeno, se tomaron mediciones diarias por 15 días de este parámetro utilizando los 20 sensores de oxígeno que están instalados en las paredes laterales a lo largo del horno. Para el cálculo de consumo de diésel que ingresa al horno se sumaron todos los datos de flujo registrados en cada rotámetro de los 24 quemadores del horno. Con el flujo resultante y la densidad del combustible se obtuvo el flujo másico de combustible que ingresa al horno.

Con el fin de evaluar el estado inicial del horno se realizó el balance de masa y energía del proceso, para lo cual se cuantificaron los flujos de aire de entrada y salida del horno que se pueden apreciar en la Figura 1, en el cual se tomaron las mediciones de presión y temperatura en los flujos de aire y gases de combustión tal como lo realizan en sus investigaciones Testo (2015) y Velásquez (2016).

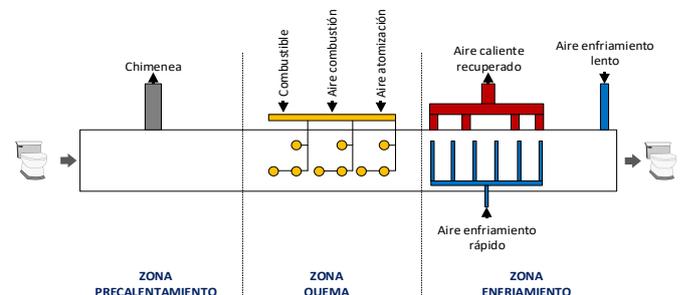


Figura 1. Esquema de los flujos de entrada y salida del horno tipo túnel.

Se determinó la velocidad de las corrientes de aire y de los gases de combustión, para lo que se tomaron datos de la temperatura (T) y la caída presión (ΔP). Con los datos de caída de presión y temperatura obtenidos, se calculó la velocidad del gas de acuerdo con la siguiente Ecuación (1):

$$V = \alpha \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\delta_f}} \quad (1)$$

Donde: V representa la velocidad del gas, α el factor del tubo Pitot, ΔP la variación de presión y δ_f la densidad del fluido (Streeter y Wylie, 2012, p. 356).

Con el valor de la velocidad media obtenida, el área transversal de cada tubería y la densidad del fluido, se calculó el flujo másico utilizando la Ecuación (2):

$$M = v_m \cdot A \cdot \delta \quad (2)$$

Donde: M es el flujo másico, v_m la velocidad media, A el área de flujo y δ la densidad del aire o gases de combustión (Uche y Marín, 2001, p. 3).

Determinados los flujos másicos de entrada y salida del horno se efectuó el balance de masa del proceso de cocción de piezas cerámicas que se da en el horno con la Ecuación (3) que se muestra a continuación

$$M_{ac} + M_{aa} + M_c + M_{er} + M_{el} = M_{ch} + M_{acr} \quad (3)$$

Donde: M_{ac} es el flujo másico del aire de combustión, M_{aa} el flujo másico del aire de atomización, M_c el flujo másico del combustible, M_{er} el flujo másico del aire de enfriamiento, M_{el} el flujo másico del aire de enfriamiento lento y M_{ch} el flujo másico de los gases de la chimenea (Felder y Rousseau, 2004, p. 89).

Para el cálculo del balance de energía se calcularon los flujos de calor que intervienen en el horno que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros evaluados y valores empleados en la electrocoagulación

Flujo de calor de entrada	Flujos de calor de salida
Flujo de calor contribuido por el combustible (Q_c)	Flujo de calor necesario para el proceso (Q_p)
	Flujo de calor perdido por las paredes del horno (Q_{pp})
	Flujo de calor perdido por los coches o vagonetas (Q_v)
	Flujo de calor perdido por chimenea (Q_{pc})
	Flujo de calor perdido por corriente de aire caliente recuperado (Q_{acr})

(Inostroza, 2013; Auces y Rodríguez, 2003)

Con las entalpías y flujos másicos de las corrientes de entrada y salida, antes calculadas, se determinó el balance de energía mediante la siguiente Ecuación (4): (Felder y Rousseau, 2004, p. 320).

$$Q_c = Q_p + Q_{pp} + Q_v + Q_{pc} + Q_{acr} \quad (4)$$

2.2. Determinación de la relación de flujo combustible/aire para cada zona de quemadores del horno

Se inició por determinar la relación teórica combustible-aire sobre la base de la composición del diésel. Con la composición del diésel, se calculó el aire teórico requerido para una combustión completa utilizando la Ecuación (5) que se muestra a continuación que es aplicable para combustibles líquidos y que fue diseñada con base en la estequiometría de la reacción de la combustión.

$$\frac{\text{ft}^3 \text{ aire}}{\text{gal combustible}} = \{[\%C * 1,514] + [\%H + 4,54] + [\%S * 0,568] - [\%O * 0,568]\} * \delta_c \quad (5)$$

Donde: $\% C$ es la concentración de carbono, $\% H$ es la concentración de hidrógeno, $\% S$ es la concentración de azufre, $\% O$ es la concentración de oxígeno y δ_c es la densidad del combustible (lb/gal) (Brizuela, 2018, p. 13).

A la relación combustible-aire teórica obtenida, se adicionó el porcentaje de exceso que por experiencia de operación del horno se trabaja con 20 % de acuerdo con el procedimiento

operativo de los hornos tipo túnel. Como la concentración de oxígeno a la altura de la ciudad de Quito es menor a la presente a nivel de mar, fue necesario realizar la corrección por la altitud (Hurtado, 2014, p. 25). Usando como referencia la relación combustible-aire determinada, se realizó la calibración de los quemadores con el objeto de determinar las condiciones de operación a las que se genera una menor concentración de contaminantes al aire, sin que esto afecte a la calidad del producto (Baukal, 2012; García, 2015; Heredia y Páez, 2008; Mavainsa, 2018).

La calibración se realizó por grupos de quemadores que están divididos en las zonas de quema como se muestra en la Figura 2, con el objeto de minimizar la probabilidad que se den cambios bruscos en los parámetros de operación del horno y generen defectos en la calidad de los productos.

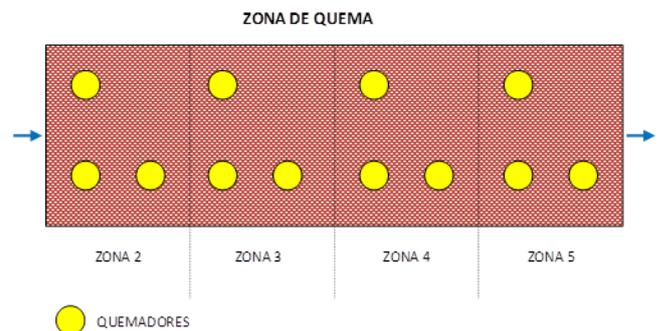


Figura 2. Esquema de zonas de quemadores

Para realizar los ajustes de los quemadores se trabajó de la siguiente manera:

Se tomaron los flujos de combustible y del aire de combustión inicial en el quemador. El flujo de combustible se midió a través de los rotámetros y el flujo aire de combustión se midió a través de las tomas de presión de cada quemador, con ese valor se ingresó en la Tabla 2 donde se muestra una relación entre la presión y el flujo de aire (Muñoz y Rovira, 2014)

Tabla 2. Relación entre la presión de ingreso de aire de combustión al quemador y el flujo

Presión (in H ₂ O)	Flujo aire de combustión (ft ³ /h)	Presión (in H ₂ O)	Flujo aire de combustión (ft ³ /h)
10	1 547	20	2 188
11	1 622	21	2 242
12	1 695	22	2 294
13	1 764	23	2 346
14	1 830	24	2 396
15	1 895	25	2 446
16	1 957	26	2 494
17	2 017	27	2 542
18	2 075	28	2 588
19	2 132	-	-

Con la información de los flujos de aire y combustible, se verificó si hay un exceso o defecto de aire, comparándola con la relación combustible-aire teórica calculada. En caso de existir un exceso o defecto de aire, se modificó gradualmente el flujo de entrada de aire de combustión, hasta el valor más próximo a la relación teórica. Simultáneamente, se tomaron mediciones de la composición de los gases de combustión en

la chimenea y de los parámetros de operación del horno para verificar el efecto de los cambios realizados (Rivera, 2017; Testo 2015).

2.3 Evaluación del funcionamiento global del horno con los parámetros ajustados.

Después de realizar la calibración de los quemadores de cada zona y determinar las condiciones en las que se generan la menor cantidad de emisiones gaseosas, se operó de forma conjunta todos los quemadores a las nuevas condiciones. Para ello se fueron ajustando a los quemadores de cada zona, a las condiciones determinadas anteriormente, se mantuvo el mismo orden que se aplicó durante la calibración, es decir se inició desde la zona 5 hasta la zona 2 de quemadores. Este cambio se realizó de forma gradual para no generar variaciones bruscas en el proceso que pueda afectar al producto tomando en cuenta lo sugerido por Castiñeyra y Barrio (2015) y García (2010).

Con los quemadores funcionando en las nuevas condiciones, se esperó un lapso de 30 minutos para que el horno se estableciera y tomar mediciones de concentración de las emisiones en la chimenea. Se tomaron mediciones diarias con el analizador de gases Testo modelo 335 por el lapso de 15 días para verificar si se redujeron las emisiones a la atmósfera desde el horno de acuerdo al método planteado por Sánchez (2008) y Testo (2015).

Para asegurar que las condiciones del proceso de cocción no se vieran afectadas se realizaron mediciones diarias por 15 días de la temperatura, presión, concentración de oxígeno y consumo de combustible, se construyeron las curvas de cada parámetro para comparar con las condiciones iniciales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evaluación inicial de operación del horno

En la Figura 3, se observa que la temperatura máxima que alcanza el horno de 1 200 °C está en la ubicación de la termocupla 11 de la zona de quema 5, temperatura que es coincidente con la temperatura de consigna dada por el fabricante. Asimismo, se observa que la temperatura a la salida del producto está a 35 °C, lo que permite la fácil manipulación del producto a la salida del horno.

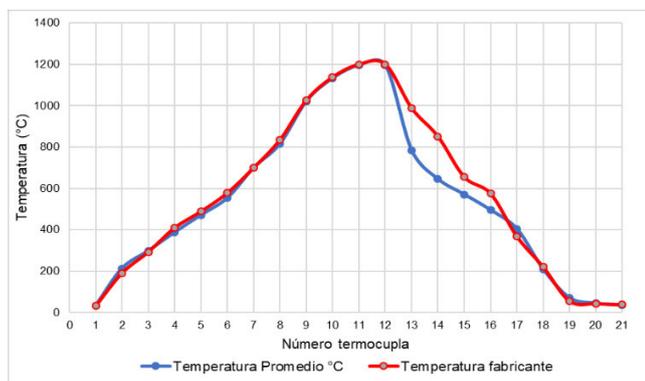


Figura 3. Curva de temperatura de cocción en las condiciones iniciales del horno

En la Figura 4 se presenta la curva de presión. Se puede observar que a lo largo del túnel la presión se eleva progresivamente desde la entrada a la salida, lo que indica que el flujo de los gases es el correcto, sabiendo que el horno utiliza los gases de combustión de la zona de quema para el precalentamiento. Esta presión negativa también puede generar ingreso de aire por la entrada al horno lo que incrementa la concentración de oxígeno en la chimenea (Ruark, 2011).

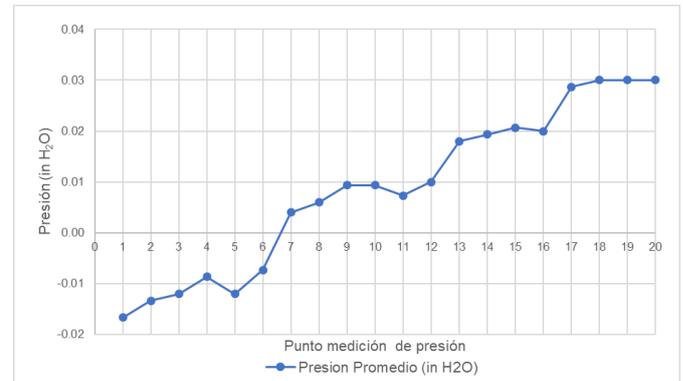


Figura 4. Curva de presión promedio a lo largo del horno túnel

En la Figura 5. se muestra la curva de concentración de oxígeno.

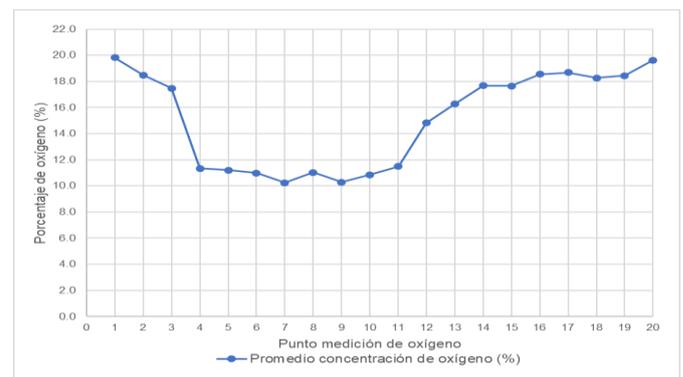


Figura 5. Curva de concentración de oxígeno promedio a lo largo del horno

El porcentaje de oxígeno tanto a la entrada como en la salida del horno está en el orden del 20 %, lo que indica la presencia de aire del ambiente en el horno debido a la presión, lo que incrementa la concentración de oxígeno en la chimenea. Como resultado de los cálculos de velocidad y flujos máxicos de las corrientes de entrada y salida del horno se determinó el balance de masa que se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Balance de masa del horno túnel

CORRIENTE	Entrada (kg/s)	Salida (kg/s)
Aire de combustión	0,87	-
Aire de atomización	0,14	-
Aire caliente recuperado	-	6,91
Enfriamiento lento	3,63	-
Enfriamiento rápido	1,14	-
Chimenea	-	2,99
Combustible (diésel)	0,05	-
Total	5,83	9,89

En el balance de masa el flujo máxico de la corriente de salida es superior al flujo máxico que ingresa, hay una diferencia de 4,06 kg/s. Esta diferencia se debe al ingreso de aire exterior, al

ser un equipo abierto, ya que no posee ningún tipo de sello que lo aisle. Es importante indicar que las normativas ambientales no consideran este ingreso de aire, que para el horno objeto del presente estudio influye en el cálculo de las emisiones debido al incremento en el factor de dilución por la elevada concentración de oxígeno en la chimenea (Ministerio del Ambiente, 2015)

Como se puede observar en la Tabla 4, el mayor aporte de calor al horno es dado por el combustible, esto debido a que este calor no solo es aprovechado en la quema sino también en el precalentamiento de las piezas (Toctaquiza, 2008).

Tabla 4. Resultado de los flujos de calor del horno

Corrientes	Entrada (kW)	Salida (kW)
Flujo de calor contribuido por el combustible (Qc)	2 261,06	-
Flujo de calor necesario para el proceso (Qp)	-	603,88
Flujo de calor perdido por las paredes del horno (Qpp)	-	105,23
Flujo de calor perdido por los coches o vagonetas (Qv)	-	1,19
Flujo de calor perdido por chimenea (Qpc)	-	319,22
Flujo de calor perdido por corriente de aire caliente recuperado (Qacr)	-	761,00
TOTAL	2 261,06	1 790,52

La diferencia entre al calor que entra y el calor que sale del horno es de 470 kW lo que indica que de toda la energía que entra al horno el 20 % no es aprovechada, esto es debido a que el horno cuenta con aislamiento solo en las paredes laterales, tanto en la entrada como en la salida el horno no cuenta con ningún tipo de aislamiento (Benítez, 2015).

3.2. Determinación de la relación combustible/aire

La relación combustible aire calculada con base en la composición de combustible fue de 1 200 ft³ de aire por galón de diésel. Se manejó un exceso de aire del 20% el cual es el mínimo recomendado para combustibles líquidos y es el que la empresa definió para la operación del horno 3, de tal manera que no ingrese oxígeno innecesario para el proceso y aumente la concentración en la chimenea, lo que perjudica a la cuantificación de las emisiones por el factor de dilución (CAR/PL, 2006, p. 127).

Con la relación combustible-aire calculada se construyó la Tabla 5, donde se muestra la relación entre el flujo de aire y el flujo combustible a los que trabajan los quemadores. El flujo de aire que se muestra en la Tabla 5 es la suma del aire de combustión más el de atomización y corregidos con el factor de 0,84 por la altitud de Quito.

Tabla 5. Relación combustible-aire corregida para la altura de Quito

Presión Estática, (pulg H ₂ O)	Flujo de aire corregido a la altura de Quito (ft ³ /h)	Flujo de combustible (gal/h)
1	799	0,67
2	1 002	0,83
3	1 157	0,96
4	1 288	1,07
5	1 404	1,17
6	1 508	1,26
7	1 604	1,34
8	1 694	1,41
9	1 778	1,48
10	1 857	1,55
11	1 932	1,61
12	2 005	1,67
13	2 074	1,73
14	2 140	1,78
15	2 205	1,84
16	2 267	1,89
17	2 327	1,94
18	2 385	1,99
19	2 442	2,04
20	2 498	2,08
21	2 552	2,13
22	2 604	2,17
23	2 656	2,21
24	2 706	2,26
25	2 756	2,30
26	2 804	2,34
27	2 852	2,38
28	2 898	2,42
29	2 944	2,45
30	2 989	2,49
31	3 034	2,53
32	3 077	2,56
33	3 120	2,60

Tomando como referencia la Tabla 5 donde se muestra la relación combustible-aire de los quemadores se procedió a la calibración (ajustes) de los quemadores. Los resultados de la calibración de los quemadores se presentan a continuación en las Tablas 6,7,8 y 9.

Tabla 6. Resultados de calibración para los quemadores de la zona 5

Modificación	Presión de aire (inH ₂ O)	Combustible (gal/h)	[CO] ppm	[SO ₂] ppm	Porcentaje de oxígeno %
Situación Inicial	25,8	1,9	106	3,34	16,7
1	24,1	1,9	106	3,24	16,7
2	23,1	1,9	100	3,12	16,6
3	21,9	1,9	98	3,12	16,6

Tabla 7. Resultados de calibración para los quemadores de la zona 4

Modificación	Presión de aire (inH ₂ O)	Combustible (gal/h)	[CO] ppm	[SO ₂] ppm	Porcentaje de oxígeno %
Estado inicial	27,2	2,1	107,0	60	16,9
1	25,1	2,1	103,5	59	16,9
2	24,6	2,1	93,5	55	16,8
3	23,0	2,1	86,0	52	16,5

Tabla 8. Resultados de calibración para los quemadores de la zona 3

Modificación	Presión de aire (inH ₂ O)	Combustible (gal/h)	[CO] ppm	[SO ₂] ppm	Porcentaje de oxígeno %
Estado inicial	26,95	2,3	98,5	50	17,00
1	25,95	2,3	90,0	52	16,95
2	24,85	2,3	90,0	53	16,75

Tabla 9. Resultados de calibración para los quemadores de la zona 2

Modificación	Presión de aire (inH ₂ O)	Combustible (gal/h)	[CO] ppm	[SO ₂] ppm	Porcentaje de oxígeno %
Inicial	27,77	2,4	107,5	53	17,00
1	25,95	2,4	96,5	52	17,02
2	24,85	2,4	98,5	50	16,95

3.3. Evaluación del funcionamiento del horno con los parámetros ajustados

En la Tabla 10 se muestran las condiciones óptimas de operación que se determinaron para cada zona de quema, las cuales se implementaron.

Tabla 10. Flujo de combustible y presión de aire óptimas para cada zona del horno

Zona de quema	Flujo de combustible (gal/h)	Rango de Presión estática (in H ₂ O)
5	1,9	19-20
4	2,1	20-21
3	2,3	25-26
2	2,4	27-28

En todas las zonas de quema se redujo el flujo de aire con relación a sus condiciones iniciales, esto debido a que existía un exceso de aire de combustión con referencia a la relación combustible-aire, y de acuerdo a Brizuela (2018) esto ayudó a reducir la concentración de oxígeno presente en la chimenea.

En la Tabla 11 se presenta el promedio de la concentración de los contaminantes en la chimenea después de colocar todas las zonas de quema en sus condiciones óptimas.

Tabla 11. Comparación de la concentración de oxígeno y monóxido de carbono antes y después de la calibración

Parámetro	Unidad	Antes de la calibración	Después de la calibración
Oxígeno	%	17,30	17,04 ± 0,3
Monóxido de carbono	ppm	123,87	96,25 ± 5
Dióxido de azufre	ppm	62,00	64,85 ± 9

Con la calibración realizada a los quemadores, la concentración de oxígeno y de monóxido de carbono se redujeron en 1,5 % y 22.2 % respectivamente. La concentración de dióxido de azufre que depende el tipo de combustible utilizado (EP Petroecuador, 2017); sin embargo, este aumentó en 4.5 %.

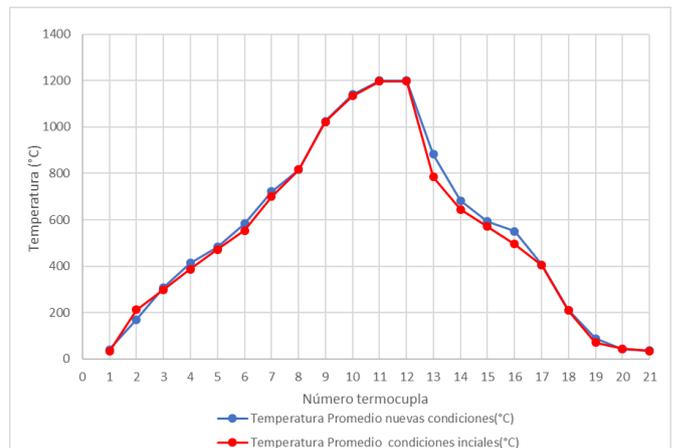
En la Tabla 12 se presentan los valores del monóxido de carbono y dióxido de azufre en mg/m³ que se calcularon para comparar con la normativa ambiental considerando 7 % de oxígeno referencial.

Tabla 12. Comparación de la concentración de monóxido de carbono antes y después de la calibración corregidos al 7% de oxígeno referencial

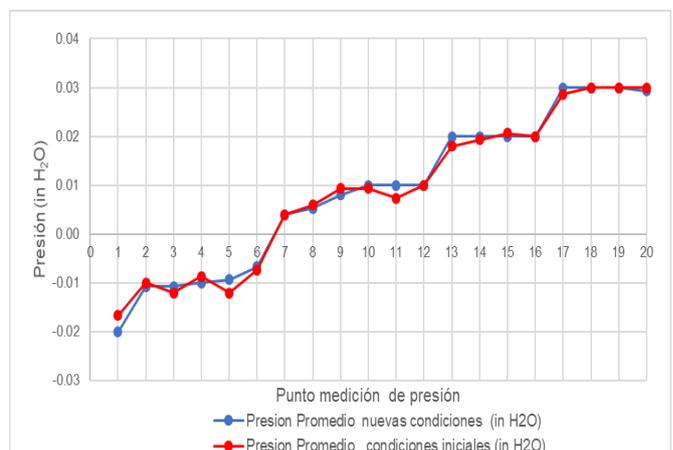
Parámetro	Antes de la calibración (mg/m ³)	Después de la calibración (mg/m ³)	Norma NT001 Ordenanza 138 (mg/m ³)
Monóxido de carbono	544	337	250
Dióxido de azufre	670	655	1200

Los valores de concentración de CO no cumplen con el valor máximo permisible por la Norma NT001 de la Ordenanza 138 del D.M. de Quito, a pesar de la calibración realizada. El porcentaje de corrección de oxígeno utilizado fue del 7 %, el cual se indica en la normativa ambiental para fuentes fijas de combustión. Este porcentaje fue definido para prevenir la dilución de los contaminantes, pero como se había mencionado en el horno hay una considerable inducción de aire, debido a las condiciones propias del proceso (Benítez, 2015). Con los ajustes realizados se logró reducir la concentración de monóxido de carbono en un 22,29 %, en relación con las condiciones iniciales.

Con los quemadores funcionando en las nuevas condiciones se realizó el diagnóstico del proceso, a fin de garantizar que los parámetros operativos no alteren la calidad del producto. La curva de cocción a las nuevas condiciones no ha sufrido cambios significativos que puedan afectar al proceso y al producto como se puede apreciar en la Figura 6, con lo que se comprueba que había un exceso de aire en la combustión que no era necesario para proceso y que se logró reducir con los ajustes de los quemadores realizados.

**Figura 6.** Comparación de temperatura de cocción entre las condiciones iniciales y las condiciones ajustadas

En la Figura 7 se puede observar la curva de presión que se construyó a las nuevas condiciones, comparada con los datos del estudio inicial. La curva de presión sufre cambios mínimos y que pueden ser debido a distintas causas, la más probable por cambios en la carga de material al horno (European, 2017).

**Figura 7.** Comparación de presión entre las condiciones iniciales y las condiciones ajustadas

En la Figura 8 se muestra que la concentración de oxígeno a las nuevas condiciones coincide con las condiciones iniciales del estudio, existe un ligero incremento de temperatura en la zona de enfriamiento rápido, que no puede generar ningún efecto, debido a que la coloración de la pieza se estableció en la zona de quema (European, 2017).

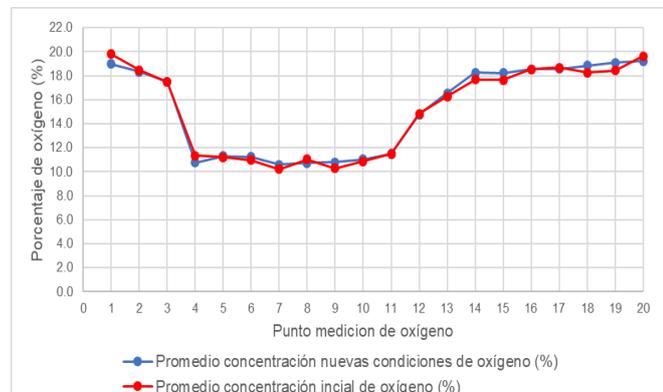


Figura 8. Comparación de presión entre las condiciones iniciales y las condiciones ajustadas

4. CONCLUSIONES

El balance de masa realizado en el horno túnel para materiales cerámicos indica que la masa que sale del horno es superior a la masa que ingresa, debido a que, al ser una fuente abierta, existe que existe inducción del aire del ambiente al interior del horno.

La alta concentración de oxígeno en la chimenea (17%) es debido a la inyección de aire para el enfriamiento. Parte de este aire sale en la corriente del aire recuperado y otra por la chimenea, lo cual generó un incremento en la concentración de oxígeno.

El exceso de aire en los quemadores no garantiza una combustión completa, ya que puede ocurrir el fenómeno inverso (combustión incompleta), debido al enfriamiento de la llama por una cantidad excesiva de aire y la formación de monóxido de carbono por la turbulencia.

Estableciendo el control sistemático de la concentración de oxígeno, mediante la calibración de los quemadores, se consiguió reducir en un 22 % las emisiones de monóxido de carbono y en 1.5 % la concentración de oxígeno sin que esto afecte la calidad del producto.

REFERENCIAS

Auces, E y Rodríguez, J. (2003). Cálculo de las necesidades de energía en un horno. *Revista de ciencia e ingeniería*, 24(3).4-6

Baukal, C. (2012). *Combustion handbook*. (1ra Ed.). Tulsa, EEUU: Editorial John Zink.

Blanco, F. (2013). *Cerámicas, lección 7.- Cocción*. Universidad de Oviedo, Escuela de minas, tecnología de cementos, vidrio y cerámica. Recuperado de [www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.COCCION .pdf](http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.COCCION.pdf) (Agosto 2019).

Benítez, L. (2015). *Organización y gestión de las operaciones de cocción de productos cerámicos*. (5ta Ed.). Madrid, España: Editorial Elearning S.L.

Brizuela, E. (2018). *Combustión*. Recuperado de <http://materias.fi.uba.ar/6730/Tomo2Unidad8a.pdf> (Noviembre 2019)

Castiñeyra, I. y Barrio, J. (2015). *Análisis y descripción gráfica del funcionamiento de los hornos cerámicos*. Recuperado de http://ceramica.name/tecnologia_ceramica/Archivos/Hornos%20ceramico.pdf (Julio, 2019)

Centro de actividad regional para la producción más limpia (CAR/PL), (2006). *Prevención de la contaminación en el sector cerámico estructural*. Recuperado de <http://www.cprac.org> (Noviembre 2019)

Espinosa, A. (2010). *Diseño e Implementación del Monitoreo de las variables de control de los hornos túnel 1,2 y 3 de Cerámica en EDESA*. (Tesis ingeniería). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

EP Petroecuador, (2017). *Revisión de calidad de combustibles de tanques de despacho*. Recuperado de <https://www.eppetroecuador.ec/wpcontent/uploads/downloads> (Mayo 2019)

European, C. (2017). *Ceramic Manufacturing Industry*. Recuperado de http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/cer_bref_0807.pdf (Mayo 2019)

Felder R. Y Rousseau R. (2004). *Principios Elementales de Procesos Químicos*. (3ra. Ed.). México: Editorial Limusa S.A.

García, R. (2015). *Combustión y combustibles*. Recuperado de <http://www.uruguayeduca.edu.uy/Userfiles/P0001/File/COMBUSTION.pdf> (Diciembre 2018)

García, S. (2010). *La contratación del mantenimiento industrial (1ra ed.)* Madrid, España: ediciones Diez de Santos

Gómez, C., (2018). *Todo sobre Hornos*. Recuperado de <http://www.si3ea.gov.co/eure/9/inicio.html> (Noviembre 2019)

Grupo del Banco Mundial (GBM), (2007). *Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de baldosas cerámicas y artefactos sanitarios*. Recuperado de https://www.ifc.org/wps/wcm/co_nnect/8cac9280488554f9b4f4f66a6515bb18/0000199659ESes%2BCeramic%2BTile%2BAnd%2BSanitary%2BWare.pdf?MOD=AJPERES (Enero 2019)

Heredia D. Y Páez D. (2008). *Monitoreo de las Emisiones de combustión en Fuentes Fijas en Industrias del Cantón Rumiñahui*. (Tesis Ingeniería). Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.

Hurtado, C. (2014). *Efectos de la Altitud sobre la Combustión*. Recuperado de http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rmuto/n35/n35_a03.pdf (Julio, 2019)

Inostroza, L. (2013). *Evaluación de la eficiencia térmica del horno túnel de cocción de sanitarios cerámicos de la planta n°1 Fanaloza*. Recuperado de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/414/1/Villa_Inostroza_Luis_Jorge.pdf (Abril 2019)

Mavainsa, R. (2018). *Combustión*. Recuperado de http://www.mavainsa.com/documentos/3_combustion.pdf (Noviembre 2019)

Mezquita, A. y Monfort, E. (2010). *Sector azulejo y comercio de emisiones: reducción de emisiones de CO2, benchmarking europeo*. *Boletín de la Sociedad Española de cerámica y vidrio*, 48(4), 211-222

- Ministerio del Ambiente. (2015). Acuerdo No. 097 Reforma al Texto Unificado de legislación secundaria del Ministerio de Ambiente TULSMA. Quito, Ecuador
- Montfor et al. (2012). La evolución energética del sector español en cerámicas. Recuperado de: <http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/121455/64035.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Septiembre 2020)
- Municipio D.M. Quito. (2016). NT001 Norma técnica para emisiones a la atmósfera de fuentes fijas y de procesos industriales. Quito, Ecuador
- Muñoz, M y Rovira, A. (2014). Maquinas térmicas. (1ra. Ed.). Madrid, España: Editorial Universidad Nacional
- Perry, R., Green M. y Maloney W. (2018). "Perry's Chemical Engineers' Handbook" (9na ed), Ney York: McGraw-Hill
- Rivera, A. (2017). Combustión industrial aplicada y control de contaminantes. Recuperado de <http://www.cdts.espol.edu.ec/documentos.htm> (Enero 2019)
- Ruark, R. (2011). Kiln connection: Pressure control in túnel kilns. Recuperado de <https://www.ceramicindustry.com/articles/91948-kiln-connection--pressure-control-in-tunnel-kilns> (Abril 2019)
- Sánchez, J. (2008). Elaboración de un sistema de control para la cocción de ladrillos en un horno de combustión. (Tesis Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
- Streeter, V. y Wylie, E. (2012). Mecánica de Fluidos. (8 va. Ed). México: Editorial McGRAW-HILL
- Testo, (2015). Testo 330, analizador de gases de combustión. Recuperado de <https://media.testo.com/media/20/3c/b085a5c2c3fa/testo-330-Manual-de-instrucciones.pdf> (Diciembre 2018)
- Toctaquiza, O. (2008). Optimización del Proceso de Cocción en la producción de ladrillos de Cerámica Roja en el Cantón Chambo. (Tesis Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
- Uche J. y Marín M. (2001). Simulación y optimización de un horno cerámico monocapa. Boletín de la Sociedad Española de cerámica y vidrio, 20(5), 377-383
- Velásquez, A. (2016). Balance de masa y Energía en tuberías y accesorios hidráulicos. Recuperado de: http://www.dimecusach.cl/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=70 (Diciembre 2018)

BIOGRAFÍAS



Daniel Eduardo Sotalín Quijía. Nació en Quito, Ecuador en 1982. Ingeniero Químico con mención Ambiental por la Escuela Politécnica Nacional, profesional con 10 años de experiencia en Sistemas de Gestión de Calidad, Ambiente y Seguridad aplicado a la industria. Ha laborado como Técnico Ambiental en la empresa Edesa S.A. 2010-2012. Actualmente es el responsable del Sistema de Gestión

Ambiental y Calidad en la empresa Novopan del Ecuador S.A. Identificador ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2700-6045>. dsotalin@pelikano.com / 0998 480 6762



Lucía Margarita Montenegro Aguas. Ingeniera Química, Magister en Ingeniería Ambiental ha sido docente por 24 años en la EPN de las cátedras de Transferencia de Calor, Control de la Contaminación del Aire entre otras. Cuenta con la Certificación de Evaluador de la Norma ISO 17025 para laboratorios. En referencia a las publicaciones las ha realizado en la "Revista Politécnica" y en la "1st International Conference on Water and Sustainability" con temas relacionados al Tratamiento de aguas y Remediación de Suelos. Ha dictado más de 20 seminarios y conferencias de Monitoreo Ambiental; y dirigido más de 40 proyectos de titulación en temas de Transferencia de Calor, Refinación del Petróleo y Contaminación Ambiental. Identificador ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5706-9979>. lucia.montenegro@epn.edu.ec / 099 969 4133



Marcelo F. Cabrera J. Nacido el 05 de marzo de 1986 en Quito-Ecuador, estudios completos de pregrado en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero Químico Aprobado Cum Laude. Título de posgrado en la Universidad Internacional SEK como Magíster en Gestión Ambiental. Ha trabajado en Incinerox, Chemeng, Unidad Educativa Jean Jacques Rousseau, Escuela Politécnica Nacional y Universidad Internacional del Ecuador donde hasta la actualidad labora como docente en la Escuela de Gestión Ambiental en la UIDE y Coordinador del Laboratorio de Análisis Instrumental de la EPN. Ha realizado 5 publicaciones en revistas LatinIndex y 6 conferencias sobre contaminación ambiental y cursos de perfeccionamiento docente. Identificador ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0955-3616>. macabrera@uide.edu.ec / marcelofabian_cabrera@yaho.com / 0998492245

Evaluación y Reforzamiento de una Estructura Patrimonial de Adobe con Irregularidad en Planta

Chacón, Juan ^{1,*} ; Suquillo, Betzabeth ² ; Sosa, Diego ¹ ; Celi, Carlos ³ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

²Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ambato, Ecuador

³Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Quito, Ecuador

Resumen: En el Ecuador existe una gran cantidad de estructuras patrimoniales hechas con materiales frágiles como el adobe. Eventos sísmicos recientes han puesto en manifiesto el pobre desempeño de este tipo de estructuras debido a su gran masa y poca capacidad de resistir cargas sísmicas. Este artículo presenta la evaluación del edificio del antiguo Colegio Simón Bolívar y varias técnicas de reforzamiento en el sistema de muros portantes de esta estructura patrimonial de adobe con irregularidad en planta, que está ubicada en el casco colonial de la ciudad de Quito. Este estudio supone que las fuerzas externas actúan en dirección del plano más resistente de la pared y que los muros de adobe tienen poca capacidad de resistir cargas laterales fuera del plano. Basado en estas condiciones, un análisis de sensibilidad de la discretización para elementos finitos se presenta mediante el uso de un programa comercial y se determinan valores empíricos que relacionan la proporción entre las dimensiones de los elementos finitos y la longitud principal de los muros. Por lo tanto, esta propuesta para el mallado de los elementos finitos busca obtener proporciones iniciales para hacer un primer análisis de calibración de los elementos mediante el control de esfuerzos y desplazamientos. El presente trabajo evalúa el mallado de elementos finitos comúnmente utilizado para el análisis de estructuras bidimensionales por lo que se destaca la importancia de la calibración inicial del mallado de elementos para obtener resultados confiables.

Palabras clave: Adobe, edificaciones patrimoniales, irregularidades estructurales

Evaluation and Reinforcement of an Adobe Heritage Structure with Plan Irregularities

Abstract: Ecuador has many heritage structures made of fragile earth-based materials like adobe. Recent seismic events have revealed the poor performance of these structures due to their large mass and low capacity to withstand seismic loads. This article presents the evaluation of Simon Bolívar high-school old building and different reinforcement techniques in this heritage structure of adobe wall system with plan irregularities, located in Quito downtown. This study considers that the external forces are acting in the direction of the strongest plane of the wall, and adobe walls have low capacity against plane lateral loads. Based on those conditions, a sensitivity analysis of the finite element discretization is presented with the use of a commercial program, and empirical values that relate the proportion of the finite element and the main length of the wall are determined. Thus, this proposal of finite element meshing aims to obtain initial ratios for elements size to make a first calibration analysis by controlling stresses and displacements. This proposal evaluates the finite element meshing commonly used in bidimensional structures, so the importance of the initial meshing calibration to obtain reliable results is pointed out.

Keywords: Adobe, heritage buildings, structural irregularities

1. INTRODUCCIÓN

En el Ecuador existe gran cantidad de estructuras patrimoniales y la mayoría de ellas se ubican dentro de las zonas céntricas o núcleos históricos de las principales ciudades. Estas estructuras en su mayoría son sistemas frágiles

compuestos de materiales elaborados con base en tierra amasada, tapia, bahareque y particularmente adobe.

Antes del uso del acero y el hormigón como materiales de construcción, las construcciones en tierra se extendieron por todas las regiones del mundo dado que es un material

*juansagitarius@hotmail.com

Recibido: 27/03/2020

Aceptado: 06/01/2021

Publicado: 28/02/2021

10.33333/rp.vol47n1.05

CC BY 4.0

abundante en la naturaleza y que ha llegado a satisfacer la necesidad de vivienda desde los inicios de la humanidad.

Las construcciones elaboradas con tierra, como el adobe, poseen excelentes propiedades térmicas y acústicas. Además, esta tipología estructural es una tecnología simple y de bajo costo. Sin embargo, son estructuras muy vulnerables ante fenómenos naturales como lluvias y principalmente sismos.

Frente a movimientos telúricos, las edificaciones de este tipo sufren daños estructurales severos, que llegan incluso al colapso, causando con ello pérdidas cuantiosas en términos de vidas humanas y patrimoniales. En el caso de un evento sísmico, el comportamiento de este tipo de estructuras es deficiente debido al excesivo peso de los muros que conforman el sistema estructural resistente y su limitada capacidad de disipar energía (Blondet, García y Brzev, 2003).

Basado en experiencias e investigaciones previas de rehabilitación y reforzamiento, en las que se comprueba un mejor comportamiento de este tipo de estructuras ante un sismo de diseño (Casanovas and Díaz, 2007), el presente trabajo plantea alternativas de reforzamiento viables y aplicables a nuestro medio (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 1997). Además, toma en cuenta normativas extranjeras de países de la región andina, como Perú (Norma Peruana, 2006) y Chile (Norma Chilena, 2013), cuyas características de materiales y construcción se suponen similares a las del Ecuador.

1.1. Revisión de Normas para Estructuras de Adobe

Varios países de la región andina que se encuentran en zonas de alto riesgo sísmico, como Chile y Perú, han enfocado sus investigaciones en el desarrollo de nuevas tecnologías adaptables y aplicables a construcciones existentes en tierra. Estos países han propuesto normativas y lineamientos a seguir para un diseño sísmico resistente de edificaciones nuevas y para reforzamiento de estructuras existentes.

E080: Norma Peruana para Adobe

Esta normativa (Norma Peruana, 2006), recomienda una configuración estructural con las siguientes características para tener una resistencia sísmica:

- Suficiente longitud de muros en cada dirección.
- Una configuración planta que tienda a ser simétrica o cuadrada de ser posible.
- Las aberturas deben ser pequeñas para puertas y ventanas.
- Definir un sistema de refuerzo dependiendo de la esbeltez de los muros.

La fuerza sísmica horizontal se determina con la ecuación 1:

$$H = S \cdot U \cdot C \cdot P \quad (1)$$

En donde S es el factor del suelo, U es el factor de uso, C es el coeficiente sísmico (C depende de la zonificación sísmica que

en Perú son tres y oscila de 0.10 a 0.20g) y P es el peso total de la edificación incluyendo carga muerta y 50% de carga viva.

NCh3332: Norma Chilena-Intervención de Construcciones Patrimoniales de Tierra Cruda

Esta normativa (Norma Chilena, 2013), recomienda una configuración geométrica estructural con las siguientes características:

- La esbeltez de los muros no debe ser mayor que 8.
- Los vanos no deben tener un ancho mayor que 2.5 veces el espesor del muro.
- Los vanos de ventanas y puertas se deben ubicar a una distancia no menor que tres veces el espesor del muro desde el borde libre más próximo (Figura 1).
- La longitud entre ejes de arriostamientos transversales de un muro debe ser menor a seis veces el espesor del muro.
- La verticalidad relativa de un muro, que es la uniformidad del espesor del muro en altura, no debe ser mayor que el 10% de su altura.

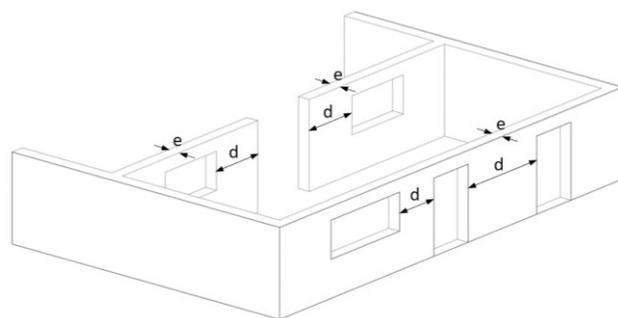


Figura 1. Vanos ventanas y puertas (d: distancia desde el borde libre más próximo, e: espesor del muro)

La fuerza sísmica horizontal para la NCh3332 se determina mediante la ecuación 2:

$$Q_o = k_1 k_2 k_3 C \cdot P \quad (2)$$

En donde k_1 es el factor de modificación por desempeño, k_2 es el factor de modificación por categoría de ocupación, k_3 es el factor de modificación por clasificación del tipo de suelo, C es el coeficiente de demanda sísmica para las estructuras de tierra cruda (se adopta 0.1) y P es el peso sísmico del elemento a verificar.

2. DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL

Dentro de los planes de recuperación del centro histórico de la ciudad de Quito se proyecta la rehabilitación arquitectónica-estructural del antiguo colegio Simón Bolívar (Figura 2). Este edificio colonial se convertirá en la nueva sede de las Naciones Unidas (NNUU) y se ubica dentro del casco colonial de la ciudad de Quito declarada como Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO el 8 de septiembre de 1978. (Instituto Nacional de Cultura y Patrimonio, 2014).

La edificación consta de una estructura en su mayoría de muros de adobe distribuido en cinco diferentes niveles. Además, un sistema de entresijos y cubiertas compuestas de madera como componente principal.



Figura 2. Antiguo – Colegio Simón Bolívar
Fuente: <http://www.prensa.quito.gob.ec>

2.1. Propiedades de los Materiales

Los materiales de los que están compuestos los elementos muro en su mayoría corresponden a adobe y en lugares como la capilla varios muros están compuestos de ladrillo (Figura 3). Las cubiertas y entresijos se estiman como madera tipo B según el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino-Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC, 1984). Los elementos de refuerzo como la viga cabeza de muro se proyectan en hormigón. La resistencia específica a la compresión a los 28 días (f_c) se estima de 21 MPa (2100 T/m²) y las barras de acero de refuerzo grado 60 tendrán una resistencia a la fluencia (f_y) de 420 MPa (42000 T/m²).

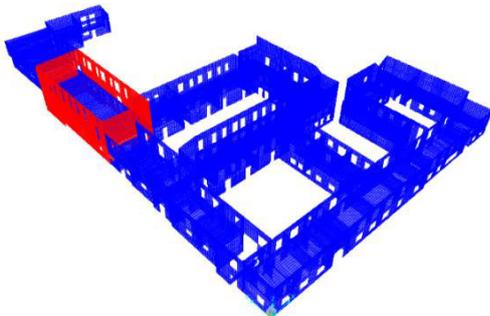


Figura 3. Distribución de materiales de los muros de adobe (azul) y ladrillo (rojo)

Tabla 1. Propiedades de los materiales (Novillo, 2012)

Material	Propiedad	Abreviatura	Valor
ADOBE	Módulo de Elasticidad	E_o	21000 Ton/m ²
	Resistencia a Compresión	f_c	12 Ton/m ²
	Módulo de Corte	G_o	5000 Ton/m ²
LADRILLO	Módulo de Elasticidad	E_o	475000 Ton/m ²
	Resistencia a Compresión	f_c	950 Ton/m ²
	Módulo de Corte	G_o	190000 Ton/m ²
SUELO	Capacidad Admisible	σ_{adm}	12 Ton/m ²
	Coefficiente de Balasto	k_b	1800 Ton/m ³

Para estimar el contacto de los muros con el suelo de fundación, se supone una cimentación rígida que transmitirá las resultantes directamente al suelo.

Las propiedades mecánicas del material de los muros fueron obtenidas mediante ensayos simples y con densidad de muestreo baja (Novillo, 2012). Además, este estudio considera solamente valores promedio en todo el volumen de muro. En la Tabla 1 se describen las propiedades de los materiales utilizados para el análisis de la estructura.

2.2. Modelo matemático

Para obtener la sollicitación de esfuerzos en los elementos de la estructura se idealizaron varios modelos matemáticos en el programa SAP 2000 v.15 (Structures, 2015). Los modelos se emplearon para el análisis de vulnerabilidad y rehabilitación de la estructura en estudio.

La modelación de los muros estructurales se realizó por medio de elementos área tipo “CONCHA” de 4 nodos. Este tipo de elementos se caracterizan por tener 6 grados de libertad por nodo (3 desplazamientos y 3 giros). Para los elementos como vigas y viguetas se empleó elementos lineales tipo “PÓRTICO” de 2 nodos.

La configuración de mallado para la solución por elementos finitos es uno de los parámetros fundamentales para llevar a cabo el análisis de la estructura. El análisis utiliza un mallado que considera la proporción entre las dimensiones de los elementos finitos y las longitudes principales del elemento muro.

En esta investigación se presenta un análisis de proporciones de mallas, las cuales son de gran utilidad en estructuras con geometrías complejas y de gran volumen, donde un refinamiento de malla adaptativo no es viable en primera instancia debido al tiempo de cálculo computacional y a la falta de software especializado. Un objetivo de la presente propuesta es mostrar la sensibilidad del método de elementos finitos que se emplea en programas comerciales como SAP 2000 v.15 para modelar estructuras de paredes portantes.

Para el análisis se obtienen proporciones de mallado inicial que permitan realizar un control de esfuerzos y desplazamientos, en el cual se realiza un refinamiento adaptativo con el objetivo de minimizar el error lo máximo posible. Se considera realizar un primer análisis para identificar las zonas más vulnerables de la estructura mediante un mapeo de distribución de esfuerzos y control de desplazamientos.

Una limitante en el análisis fue la dificultad que representó extraer una muestra de murete inalterada, puesto que esto podía comprometer la integridad de los muros, para realizar pruebas más exhaustivas. Dentro de los muestreos se pudieron identificar propiedades mecánicas de diferentes materiales con base en tierra que datan de diferentes años de construcción.

La Figura 4 presenta el caso típico de un muro de adobe con abertura. Este caso se considera más vulnerable respecto a un muro sin aberturas. Por este motivo, la calibración del mallado de una distribución típica con abertura requiere especial atención.

El programa SAP 2000 v.15 permite hacer un mallado adaptativo automatizado. En el método de elementos finitos no importa lo refinada que sea nuestra discretización, la solución que se obtiene con este método es una aproximación. Por este motivo, los resultados deben ser evaluados con soluciones cerradas o exactas basadas en la teoría básica de resistencia de materiales y equilibrio de fuerzas. Por esta razón, se propone modelos matemáticos sencillos con soluciones exactas de desplazamientos y esfuerzos como es el caso de vigas en voladizo y vigas simplemente apoyadas para la verificación del mallado. No se dispone de una solución cerrada para un muro con aberturas, así que la discretización adaptativa de SAP 2000 v.15 no se puede comparar directamente en este caso. La identificación de las dimensiones de elementos que nos proporcionen los errores más bajos en los modelos simplificados nos indica las relaciones de aspecto adecuadas para ser utilizadas como tentativa inicial en los muros con aberturas a ser modelados en el presente estudio.

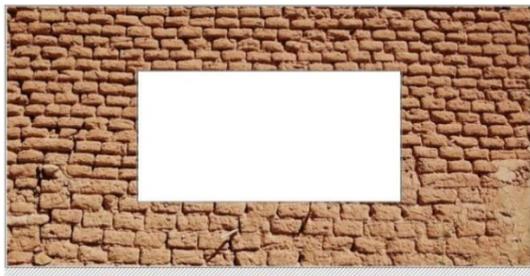


Figura 4. Muro de adobe con abertura de ventana

Los muros con abertura se modelaron mediante elementos planos en 2D tipo CONCHA, en los cuales se pueden identificar diferentes componentes en función del tipo de carga externa aplicada. Para verificar las dimensiones usadas en el mallado del muro con abertura se asumen dos modelos con soluciones exactas. El primero es “murete vertical” encargado de soportar las cargas laterales (PLAT) típicamente provenientes de un sismo y el segundo un “murete horizontal” que soporta cargas verticales (PVERT) como los entresijos, techos o niveles superiores (Figura 5). Esta aproximación solo se la utiliza para estimar el mallado inicial, ya que un muro con aberturas en realidad no se lo puede descomponer en elementos verticales y horizontales para una solución real.

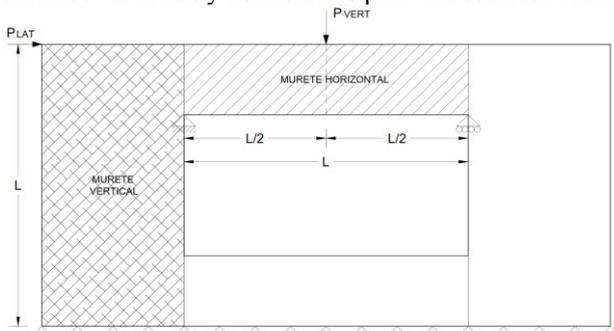


Figura 5. Muro de adobe con vano, idealizado como murete vertical y murete horizontal

Para la identificación de las dimensiones de elementos finitos en el mallado inicial se calcula desplazamientos y acciones internas máximas ante la carga externa (P) para murete vertical y murete horizontal. En el caso del murete vertical se representa como una viga en voladizo con la carga (P) en el extremo. En el murete horizontal se representa como una viga simple apoyada con la carga (P) en el centro de su longitud. Ambos casos se consideran con secciones rectangulares de gran peralte donde (b) representa el espesor del “murete” y (h) la altura de la sección (ver Figuras 6 y 7). Se tiene en cuenta los desplazamientos por efecto de deformaciones de corte y flexión mediante la aplicación del principio de trabajo virtual (ecuación 3):

$$\delta = f \cdot \sum_{i=1}^v \frac{V \cdot v \cdot L}{G \cdot A} + \sum_{i=1}^m \frac{M \cdot m \cdot L}{E \cdot I} \quad (3)$$

Donde:

- V = Fuerza de corte por carga externa
- M = Momento por para carga externa
- v = Fuerza de corte para carga unitaria
- m = Momento por carga unitaria
- E = Módulo de elasticidad del elemento
- G = Módulo de elasticidad a corte del elemento
- A = Área de la sección transversal del elemento
- L = Longitud del elemento
- I = Inercia de la sección transversal del elemento
- f = factor de forma para corte

El momento de flexión que se genera por efecto de la aplicación de la carga (P) se define como:

$$M = \sigma \cdot S \quad (4)$$

Donde:

- σ = Esfuerzo de flexión
- S = Módulo seccional

$$S = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (5)$$

Donde:

- b = base de la sección rectangular (transversal)
- h = altura de la sección rectangular (transversal)

Los desplazamientos (solución cerrada) obtenidos para el murete vertical definido como viga en voladizo y para el murete horizontal definido como viga simple apoyada son las siguientes respectivamente:

$$\delta = \frac{f \cdot P \cdot L}{G \cdot A} + \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{f \cdot P \cdot L}{4 \cdot G \cdot A} + \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (7)$$

El esfuerzo se obtiene a partir de:

$$\sigma = \frac{M}{S} \quad (8)$$

Posteriormente se analizaron 36 modelos divididos en 6 grupos de 6 modelos cada uno para representar la idealización del murete vertical (Figura 8) y el murete horizontal (Figura

9). Además, se consideró variación en espesor (b) del muro desde 20cm hasta 120cm en intervalos de 10 cm, correspondiente a la variación de espesores existente dentro de la estructura analizada. En total se analizaron 720 modelos en los que se hace variar las dimensiones (a) y (h) como se muestra en las Figuras 8 y 9. De este análisis se obtuvo un parámetro que representa la proporción del elemento finito respecto de la longitud principal del elemento (a/L) que oscila entre valores de 0.13 a 0.25 (ver Tabla 2). Este parámetro obtenido garantiza un mallado inicial con el menor error posible de acciones internas y desplazamientos obtenidos mediante el modelo computacional.

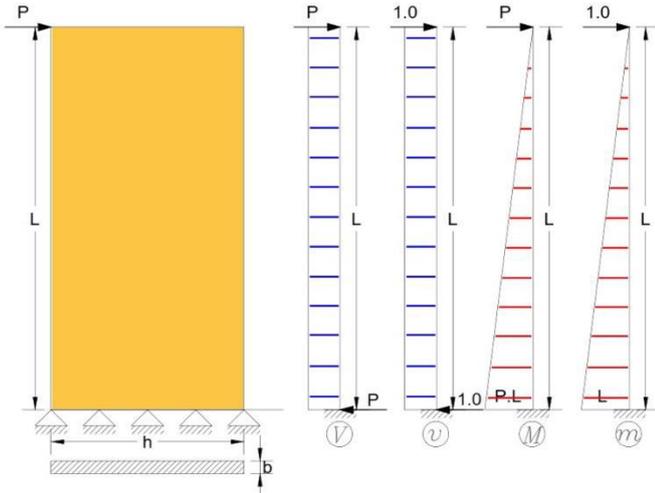


Figura 6. Acciones internas de corte y momento para murete vertical representado como viga en voladizo

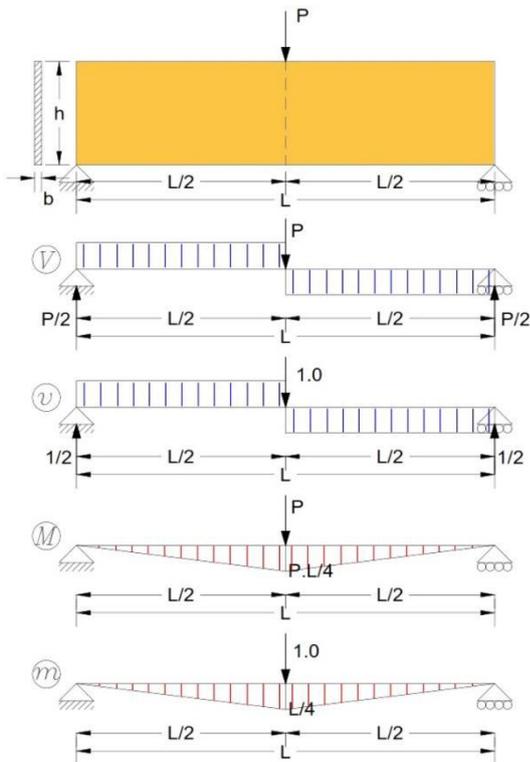


Figura 7. Acciones internas de corte y momento para murete horizontal representado como viga simple apoyada

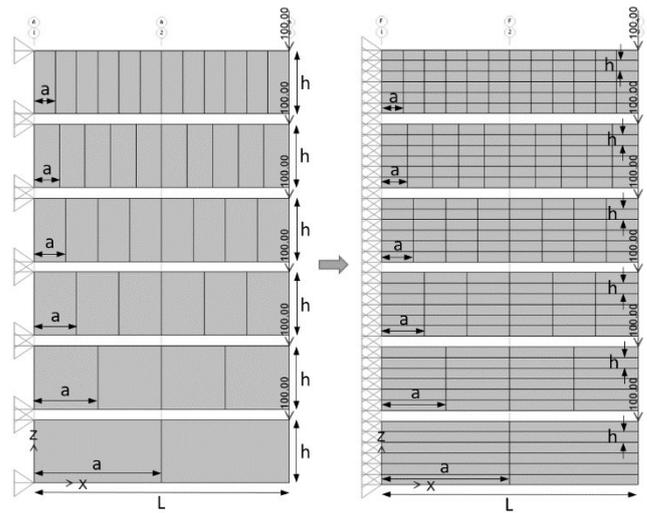


Figura 8. Mallado de Grupo 1(izquierda) y Grupo 6(derecha) para la condición de murete vertical idealizado como viga en voladizo

Finalmente, de los 36 modelos que involucran variaciones, tanto para (a) y (h) con respecto de (L) con un mismo espesor de elemento (b), se escoge 12 modelos con porcentajes de error menores (ver tabla 2).

Para la distribución de esfuerzos se notó que la disminución de la razón (a/L) o aumento en el número partes (a) genera la reducción del porcentaje de error hasta un valor mínimo (Figuras 10 y 11), pero luego el error vuelve a incrementarse. Por ejemplo, para los modelos del grupo 5 (línea continua color violeta) el error mínimo se presenta cuando el número de partes (a) se acerca a un valor de 6.00 (Figura 10) o la relación (a/L) está cercana a 0.17 (Figura 11). Luego, a medida que se incrementa el número de partes (a) o disminuye la relación (a/L) el porcentaje de error aumenta.

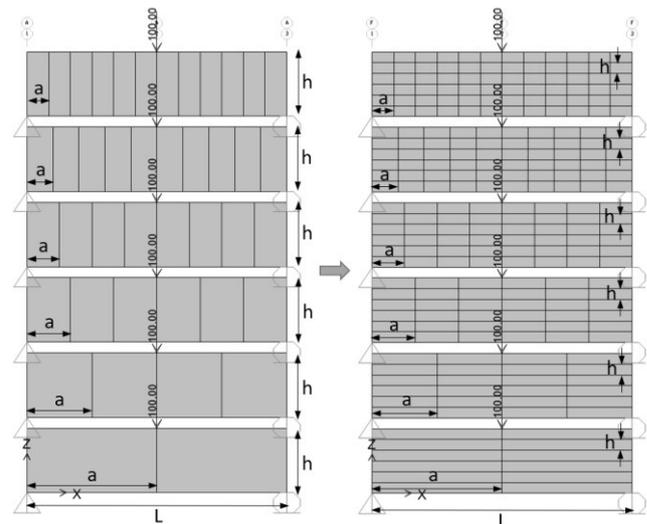


Figura 9. Mallado de Grupo 1(izquierda) y Grupo 6(derecha) para la condición de murete horizontal idealizado como viga simple apoyada

Algo similar sucede en el caso de los desplazamientos. Por ejemplo, el Grupo 5 (línea segmentada color violeta) tiene el error mínimo cuando el número de partes (a) se acerca a un valor de 4.00 (Figura 10) o cuando la relación (a/L) está cercana a 0.21 (Figura 11), mientras que para relaciones (a/L) superiores o inferiores a 0.21 el error tiende a aumentar.

Como se puede apreciar en la Figura 10, Figura 11 y Tabla 12, la reducción del porcentaje de error entre esfuerzos y desplazamientos no coincide para valores similares de (a) y (a/L). Es decir, la proporción que produce los menores errores para esfuerzos no corresponden a los menores errores para desplazamientos y viceversa.

En consecuencia, se propone obtener un porcentaje de error mínimo para ambos casos. Esto se lo consigue en el punto de intersección entre ambas curvas de errores por esfuerzo y desplazamiento (ver Figuras 10 y 11). Este punto se ha marcado con el color correspondiente al grupo seleccionado. Al tener en cuenta los puntos de intersección de todas las curvas seleccionadas se puede apreciar que el número de partes para el elemento finito (a) oscila entre valores de 4 a 7 partes. A la vez que la relación (a/L) oscila entre valores de 0.16 a 0.23 aproximadamente. En términos de valores promedios para límite inferior y superior se tendría valores entre 0.15 y 0.21 para los valores obtenidos a partir de la tabla 2.

La Tabla 2 resume las características de los modelos escogidos con menor porcentaje de error (Modelo 1 a Modelo 12). El error promedio para los casos evaluados en la Tabla 2 son 2.73% para esfuerzos y 9.32% para desplazamientos. En función de estos valores promedio de error se puede hacer una selección final de los modelos adecuados.

En la Figura 12 se plotea los errores de esfuerzo y desplazamiento de la Tabla 2 junto con los porcentajes de error promedio de 2.73% y 9.32% para esfuerzos desplazamientos respectivamente (línea segmentada color rojo). De esta manera se busca visualizar los casos que están más cercanos a los errores promedio.

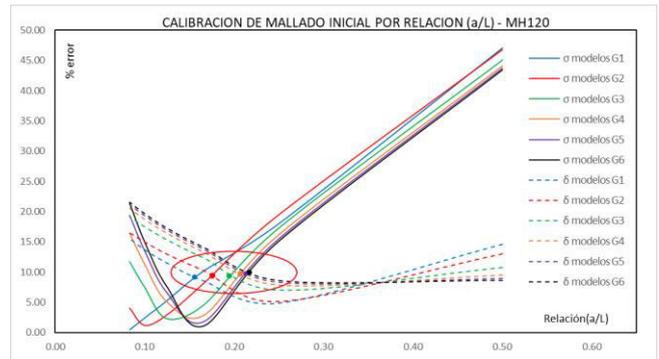


Figura 11. Calibración de mallado inicial por relación (a/L) para murete horizontal con espesor b=120cm

Tabla 2. Calibración de mallado inicial – Resumen de modelos con menor porcentaje de error – murete horizontal, espesor b=120cm

MODELO Nro	Mallado	RELACION		DESPLAZAMIENTO		ESFUERZO	
		a/L	a/h	δ(mm)	% error	σ	% error
Modelo 1	M1(6X1)	0.17	0.67	81.31	8.52	149.64	10.22
Modelo 2	M1(8X1)	0.13	0.50	83.55	11.51	157.93	5.24
Modelo 3	M2(6X2)	0.17	1.33	82.57	10.21	153.00	8.20
Modelo 4	M2(8X2)	0.13	1.00	84.64	12.97	161.81	2.91
Modelo 5	M3(6X3)	0.17	2.00	84.15	12.31	158.86	4.68
Modelo 6	M3(8X3)	0.13	1.50	86.43	15.37	170.57	2.34
Modelo 7	M4(4X4)	0.25	4.00	80.84	7.90	139.76	16.14
Modelo 8	M4(6X4)	0.17	2.67	84.88	13.29	161.90	2.86
Modelo 9	M5(4X5)	0.25	5.00	81.19	8.37	140.85	15.49
Modelo 10	M5(6X5)	0.17	3.33	85.24	13.78	163.60	1.84
Modelo 11	M5(4X6)	0.25	6.00	81.39	8.64	141.45	15.13
Modelo 12	M5(6X6)	0.17	4.00	85.46	14.06	164.74	1.16

En general no se identificó relaciones del comportamiento entre esfuerzos y desplazamientos con la variación de espesores de los elementos (b). Se empleó este sistema de mallado para muretes entre 20 cm y 120 cm de espesor en donde se encontró comportamiento similar para los parámetros (a), (a/L) y (a/h), sin que el espesor (b) modifique estos resultados.

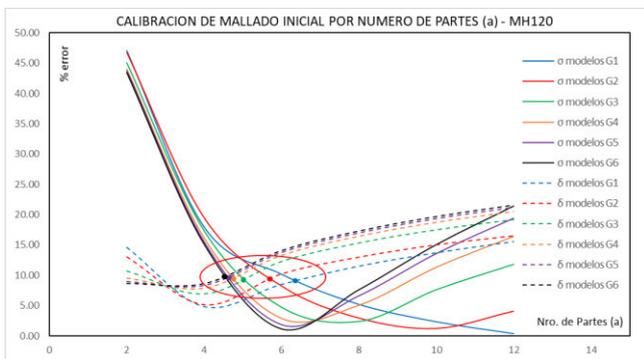


Figura 10. Calibración de mallado inicial por número de partes (a) para murete horizontal con espesor b=120cm

Se identifica en la Figura 12 que los modelos de la Tabla 2 con errores mas cercanos a los promedios son el Modelo 2, Modelo 4 y Modelo 5. Adicionalmente, la Tabla 2 tiene en cuenta la relación de proporción del elemento finito (a/h) para Modelo 2, Modelo 4 y Modelo 5 cuya relación varía entre valores de 0.5 a 2.00. Cabe aclarar que los desplazamientos (δ) y los esfuerzos (σ) presentados en la Tabla 2 son valores numéricos calculados mediante un análisis elástico lineal que considera las propiedades para Adobe de la Tabla 1 y una carga (P) de 100 toneladas. Los valores de (δ) y (σ) cambian linealmente para diferentes valores de (P), sin embargo, los errores no varían.

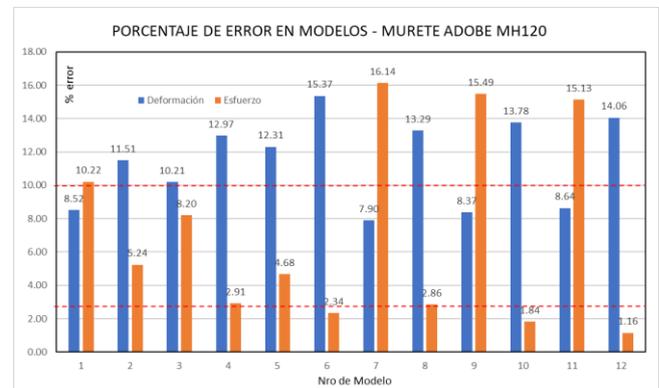


Figura 12. Porcentaje de error en modelos – Murete horizontal, espesor b=120cm

Como resultado de las proporciones adecuadas para realizar la etapa de mallado inicial se obtuvo la siguiente Tabla 3:

Tabla 3. Parámetros recomendados para mallado inicial para la solución por elementos finitos

Descripción	Parámetro	Valor
Numero de partes	(a)	6 a 8
Relación	(a/L)	0.13 a 0.25
Relación	(a/h)	0.5 a 2.0

En la Figura 14 se muestra el modelo 3D de la geometría global de la estructura utilizando un mallado de elementos finitos con la proporción estudiada. Además, en la Figura 14 también se diferencia a cada espesor de muro de acuerdo con la Tabla 4.

2.3. Criterios Generales de Diseño

Tomando en cuenta las disposiciones de la Normativa Ecuatoriana de Construcción, las estructuras de ocupación especial y edificaciones esenciales se recomendaría que la estructura estudiada en este artículo reciba análisis complejos no lineales con el fin de su evaluación estructural.

Este tipo de análisis son adecuados si el mecanismo de falla del sistema estructural puede ser modelado en el paquete computacional. Por ejemplo, SAP 2000 v.15 permite fácilmente realizar análisis no lineales de estructuras porticadas de hormigón armado o acero mediante la incorporación de rotulas plásticas (falla por flexión). En el caso de muros portantes de adobe el mecanismo de falla es totalmente diferente. Estos muros van a fallar por corte o por volteo, los cuales no pueden ser modelados en SAP 2000 v.15. En consecuencia, no se podría usar SAP 2000 v.15 para realizar análisis no lineal de muros de adobe.

Para estructuras de características tan heterogéneas como las del edificio del antiguo Colegio Simón Bolívar, se recomienda utilizar metodologías basadas en principios básicos de mecánica y experiencias empíricas para tener resultados conservadores en su análisis. Se debe resaltar que evaluaciones de este tipo de estructuras tienen gran incertidumbre por su naturaleza. Se puede realizar un análisis complejo no lineal por zonas de acuerdo con la configuración de la estructura mediante el uso de software especializado, sin embargo, esta opción está fuera de los objetivos de este estudio.

Adicionalmente, el material del que está conformada la estructura en estudio es el adobe, el cual tiene una resistencia a compresión baja. Por esta razón, los muros de adobe no tienen la capacidad de disipar energía por medio de desplazamientos y daño estructural. Por lo que se supone un comportamiento de tipo frágil.

El comportamiento no lineal de una estructural de adobe puede explicarse como una mampostería no reforzada, la cual responde aproximadamente como un bloque rígido (Figura 13). Se puede observar en la Figura 13 que el aporte de deformaciones por flexión de un muro de mampostería es insignificante por lo que se puede simplificar la respuesta real como la respuesta de un bloque rígido (Kowalsky, 2018). El cortante basal (V_b) que resiste un bloque rígido antes de iniciar el volteo del muro se presenta en la ecuación 9. Sin embargo, si la resistencia a corte del muro es baja la falla se produce por corte antes de llegar a (V_b) (Paulay & Priestley, 1992). El adobe es un material de resistencia a compresión baja por lo que la resistencia a corte también será baja. Para muros de adobe típicos del Ecuador se suele observar un comportamiento lineal hasta llegar a la falla a corte del muro, en donde se considera el colapso del mismo (Bonilla et al., 2017).

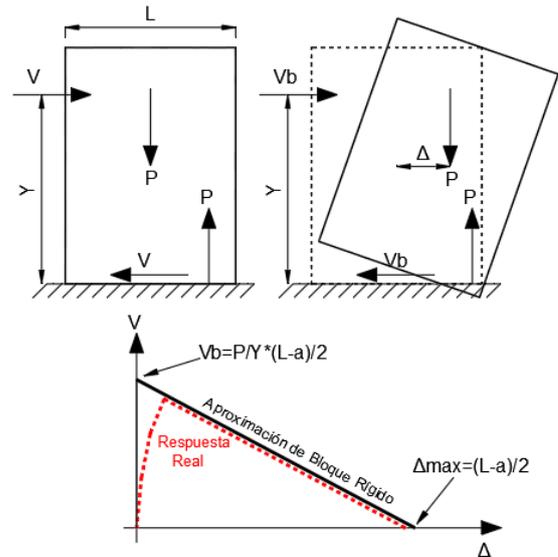


Figura 13. Curva de capacidad para mampostería no reforzada

$$V_b = P * \frac{L - a}{2} \quad (9)$$

Donde:

V_b = fuerza de corte basal que inicia el volteo

P = Carga axial

L = ancho del muro

a = altura del bloque de compresión de Whitney

Una gran limitación del presente estudio es que no considera el daño progresivo de los elementos que componen la estructura en estudio (sistema de entramado de muros y conexiones). Durante un sismo los elementos estructurales no alcanzan la falla de manera simultánea, en realidad el colapso es gradual. Los elementos con mayor vulnerabilidad irán progresivamente agrietándose y degradándose debido a las cargas cíclicas de eventos sísmico, por lo que estos aspectos representan una limitante relevante dentro del análisis propuesto. La influencia del colapso progresivo debe ser considerada para futuros análisis más detallados; este estudio descarta el colapso progresivo por las limitaciones del programa computacional usado.

A pesar de dichas limitaciones, se considera que el análisis lineal utilizando un diseño basado en fuerzas (DBF) es necesario. Este análisis se lo puede realizar por el método estático (método más utilizado por las normativas extranjeras citadas para estructuras de este tipo) o por el método pseudo-dinámico que emplea un espectro de diseño reducido por medio de un factor de reducción de respuesta (R) con sus respectivos modificadores de irregularidad en planta y elevación.

Estos análisis equivalentes son ampliamente usados con resultados adecuados en estructuras de hormigón armado y acero, sin embargo, su aplicación para muros portantes de adobe no es correcta ya que la distribución de las fuerzas inerciales del muro es diferente a las de estructuras de hormigón armado. Además, los análisis lineales no pueden representar el colapso gradual típico de estructuras de adobe.

No obstante, se consideran aplicables para una primera etapa de estudio porque permiten realizar un mapeo inicial en el cual se identifican las zonas más vulnerables de la estructura.



Figura 14. Distribución de muros por espesor

Es importante tener en cuenta que el uso del factor de reducción de respuesta estructural (R) supone un comportamiento dúctil para una estructura si es superior a la unidad. Sin embargo, estructuras o elementos estructurales elaborados en tierra suponen poca o casi nula ductilidad por lo que se propone asumir el factor de reducción de respuesta estructural $R=1.0$. El valor de $R=1$ quiere decir que los elementos estructurales deberían soportar la carga sísmica de diseño sin colapsar, lo cual es poco realista.

Esto significa que no habrá reducción de la respuesta estructural y que la estructura o elemento estructural deberá absorber la demanda sísmica completa sin disipar energía. La estructura o elemento estructural debería tener la resistencia suficiente para soportar la solicitación de carga sísmica manteniendo distribuciones de esfuerzo bajas y con un adecuado control de desplazamientos, lo cual para esta estructura no aplica porque un sismo puede generar un comportamiento de colapso progresivo.

En un caso real las acciones sísmicas máximas no pueden ser estimadas con exactitud, en consecuencia, los muros pueden colapsar si su resistencia a corte es superada por la demanda sísmica. El muro que falla deja de aportar rigidez al sistema y los esfuerzos se redistribuyen a los muros restantes. El caso real de colapso progresivo de la estructura requiere programas computacionales que puedan representar la falla a corte de los muros que están constituidos por bloques de tierra conectados con mortero. Además, el análisis correcto sería un análisis no lineal dinámico. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, esta solución ideal es computacionalmente costosa.

Las metodologías simplificadas que se presentan en este estudio deben ser comparadas en futuras investigaciones con modelos computacionales más refinados y reales. No se puede concluir que los resultados obtenidos son conservadores o correctos hasta tener una validación más exhaustiva con otras propuestas. Los resultados de este documento deben ser tomados como una primera estimación. Estos resultados deben ser evaluados a criterio del diseñador debido a las simplificaciones consideradas por los autores de este trabajo.

Tabla 4. Distribución de muros de adobe, por espesor

DISTRIBUCIÓN DE MUROS DE ADOBE			
MUROS EXTERNOS		MUROS INTERNOS	
TIPO	Esp(cm)	TIPO	Esp(cm)
ME20	20	MI20	20
ME30	30	MI30	30
ME40	40	MI55	55
ME50	50	MI60	60
ME60	60	MI70	70
ME70	70	MI80	80
ME85	85	MI90	90
ME90	90	MI100	100
ME100	100		
ME110	110		
ME115	115		
ME120	120		

La irregularidad en planta presente en la estructura analizada debe ser tomada en cuenta. Se propone emplear un concepto similar al utilizado en códigos de diseño de edificios, por lo que se considera factores de regularidad tanto en planta como en elevación (ϕ_P y ϕ_E). Estos factores poseen valores inferiores a 1.0 para estructuras con irregularidades geométricas. Estos factores producen la mayoración de la demanda sísmica porque se ubican en el denominador de la ecuación de corte basal (NEC-SE-DS) como se puede observar en la ecuación 10.

$$V = \frac{I \cdot S_a(T_a)}{R \cdot \phi_P \cdot \phi_E} \cdot W \tag{10}$$

Donde:

- V = fuerza de corte basal
- I = coeficiente de importancia estructural
- $S_a(T_a)$ = Aceleración espectral de diseño
- R = factor de reducción de respuesta estructural
- ϕ_P = coeficiente de regularidad en planta
- ϕ_E = coeficiente de regularidad en elevación
- W = carga sísmica reactiva (peso de la estructura)
- T_a = periodo de vibración de la estructura

La estructura se sitúa sobre un suelo tipo D en una zona sísmica V de alto peligro, por lo que se considera una aceleración del suelo de 0.4 g para un sismo cuya probabilidad de excedencia sea del 10% en 50 años.

Se realizó el análisis sísmico de acuerdo con la Norma Peruana E080 y Norma Chilena NCh3332. Se obtuvo una fuerza horizontal estática equivalente de aproximadamente el 26% y el 17% del peso de la estructura respectivamente.

Para el método estático de la Norma Ecuatoriana (NEC_SE_DS) se obtuvo una fuerza horizontal estática equivalente de aproximadamente 190% del peso de la estructura porque al emplear valores como el factor de importancia ($I=1.30$) (considerando a la estructura de ocupación especial) y los factores de regularidad en planta y elevación ($\phi_P=0.9$ y $\phi_E=0.9$) el coeficiente sísmico y el cortante basal se ven mayorados por un factor de 1.6.

$$V = \frac{1.3 \cdot S_a(T_a)}{1.0 \cdot (0.9) \cdot (0.9)} \cdot W$$

$$V = 1.605 \cdot S_a(T_a) \cdot W$$

El valor del período teórico promedio obtenido para los muros de la estructura es de 0.361 segundos, lo cual coincide con la meseta del espectro elástico para tipo de suelo D según NEC-SE-DS (ver Figura 15), con ello se obtiene el valor de la aceleración espectral en función del periodo de vibración $Sa(0.361 \text{ segundos})=1.19$.

$$V = 1.605 \cdot (1.19) \cdot W$$

$$V = 1.91W$$

Aun sin tomar en cuenta los factores de importancia y de regularidad en planta y en elevación, asumiendo: $I=1.0$, $\phi_P=1.0$ y $\phi_E=1.0$ se obtiene una fuerza horizontal estática de aproximadamente 119% del peso de la estructura.

$$V = \frac{1.0 \cdot (1.19)}{1.0 \cdot (1.0) \cdot (1.0)} \cdot W$$

$$V = 1.19 \cdot W$$

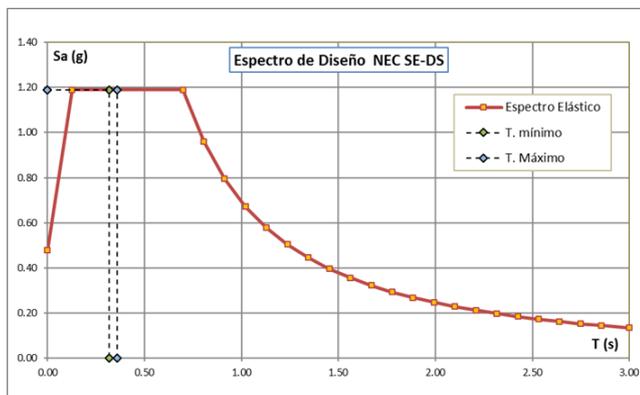


Figura 15. Espectro de diseño elástico basado en aceleraciones, para un suelo tipo D, de acuerdo a NEC-SE-DS

La norma ecuatoriana de la vivienda (NEC-SE-VIVIENDA) para estructuras de hasta 2 pisos y con luces de hasta 5.00 m propone la siguiente ecuación de corte basal:

$$V = \frac{Z \cdot C \cdot W}{R} \quad (11)$$

Donde:

V = fuerza de corte basal

Z = factor de aceleración de zona sísmica

C = coeficiente de respuesta sísmica

R = factor de reducción de respuesta estructural

W = carga sísmica reactiva

Aplicando la ecuación 11 a la estructura analizada con un factor de aceleración ($Z=0.4g$) para la zona V, coeficiente de respuesta sísmica para la región sierra ($C=3.0$) y un factor de reducción ($R=1.0$) se obtiene una fuerza horizontal estática aproximadamente 120% del peso de la estructura. Cabe indicar que la estructura en estudio es una estructura de adobe sin refuerzo y la norma indica un factor de reducción de respuesta ($R=1.5$) para estructuras con adobe y tapial reforzado, pero la norma no indica un valor para adobe sin refuerzo.

$$V = \frac{0.4 \cdot (3.0) \cdot W}{1.0}$$

$$V = 1.2W$$

Comparando los valores obtenidos de las normas citadas se evidencia la gran diferencia en el coeficiente de corte basal para la misma estructura (Tabla 5). Por este motivo, el Ecuador necesita una normativa para estructuras de adobe que incluya estructuras patrimoniales tomando en cuenta la configuración de regularidad geométrica porque el empleo de la norma de diseño sísmico para edificaciones (NEC-SE-DS) o la norma para viviendas (NEC-SE-Vivienda) pueden resultar en solicitaciones exageradas en comparación con otras normas extranjeras.

Tabla 5. Comparación de coeficientes de corte basal

Norma	Porcentaje de Corte Basal
Norma Peruana E080	26 %
Norma Chilena NCh3332	17 %
Norma Ecuatoriana (NEC-SE-DS)	190%
Norma Ecuatoriana (NEC-SE-Vivienda)	120%

Otra limitante en el uso del método estático lineal es la forma como considera las cargas sísmicas en la estructura. Este método supone que la masa se concentra en el sistema de entrepisos (losas), pero en una estructura compuesta de un sistema de muros la distribución de la masa no es concentrada sino distribuida de acuerdo con el volumen de cada muro. En realidad, esto no sería un problema en un análisis no lineal historia-tiempo de un modelo que pueda considere los mecanismos de falla de muros de adobe.

Es necesario plantear un método que tome en cuenta dicha distribución contemplando el acople entre los diferentes muros y sistemas de entrepiso porque el desplazamiento de un elemento incide sobre los elementos adyacentes. Por este motivo una solución sería usar un sistema de masas acopladas

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evaluación Sísmica Estructural

La vulnerabilidad sísmica depende de las características y calidad de los elementos que componen la estructura frente a un evento específico. El estudio de vulnerabilidad sísmica depende de la posible respuesta de la estructura frente al movimiento sísmico bajo ciertos parámetros de evaluación. Cuando se califica la vulnerabilidad sísmica que presentan las construcciones se cuenta con diferentes metodologías; éstas se utilizan tanto en términos relativos (clases e índices de vulnerabilidad) como en términos absolutos (matrices de probabilidad de daño, funciones de vulnerabilidad y curvas de fragilidad) (Aguilar, Gonzalez y Gómez, 2014).

Para el estudio de vulnerabilidad sísmica de la estructura en análisis, se recurrió al método empírico italiano (Benedetti y Petrini), desarrollado para edificaciones de adobe y de albañilería. Con dicho método se determina el índice de vulnerabilidad a través de la suma ponderada de los valores que representan la calidad sísmica de los elementos estructurales y no estructurales. Luego de la aplicación del método italiano en la estructura de estudio se obtuvo como resultado que es muy vulnerable (ver Tabla 6).

También se realizó el estudio de vulnerabilidad de la estructura en base a algunos parámetros adicionales como el método de densidad de muros. Esta metodología se basa en la relación entre el área en planta de los muros resistentes y el área total en planta de la estructura. Este método tiene una desventaja ya que no toma en cuenta la altura de la estructura por lo que no influye la esbeltez de las paredes y la masa en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica (Sánchez, 2013).

Tabla 6. Análisis de vulnerabilidad sísmica aplicando metodología italiana

Parámetro	ki	wi	ki*wi
Distribución de muros	6	1	6
Tipo de organización estructural	10	0.5	5
Calidad del sistema resistente	20	1	20
Relación demanda – capacidad	4	0.5	2
Tipo de suelo y pendiente	5	1	5
Configuración en planta	4	0.5	2
Entrepisos	2	1	2
Cubierta y sistema de techos	6	0.75	4.5
Abertura en muros	4	1	4
Conservación actual de la estructura	6	0.25	1.5
Elementos no estructurales	12	1	12
IV			64
Estructura muy Vulnerable			

La densidad obtenida en los muros es de aproximadamente 12% para cada dirección principal. Esto indica una buena configuración y disposición de los muros en planta, pero este parámetro no es concluyente. Por este motivo se propone en la evaluación de vulnerabilidad algunos parámetros adicionales como esfuerzos y desplazamientos en el sistema de muros.

En la Figura 16 se puede observar la distribución de esfuerzos generados ante la sollicitación de carga sísmica. Se concluye que en la mayoría de los muros sobrepasa la capacidad de esfuerzos admisibles a corte del adobe (2.5t/m2) lo que se interpreta como falla y colapso parcial o total de estos elementos. En este caso se estima colapso de aproximadamente 90% de los muros que componen la estructura.

En la Figura 17, se puede apreciar los desplazamientos de los muros más exigidos cuyo límite permisible de derivas es de ($\Delta M \leq 0.01$). Suponiendo un comportamiento similar a un sistema de mampostería según NEC-SE-DS se tiene:

$$\Delta M = 0.75 \cdot R \cdot \Delta E \tag{12}$$

Donde:

ΔM = deriva máxima inelástica

ΔE = deriva por la aplicación de fuerza lateral reducida

R = factor de reducción de respuesta estructural

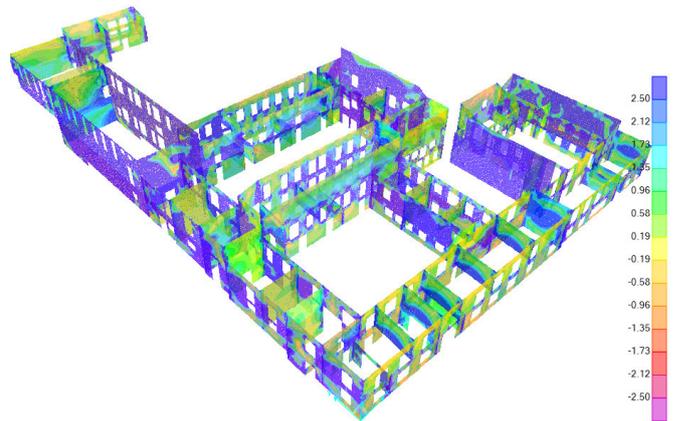


Figura 16. Distribución de esfuerzos con sismo en dirección X – Estructura en estado actual. Esfuerzo S23(t/m2) SAP2000 v15.2.1

Considerando un factor de reducción de respuesta estructural ($R=1.0$) para estructuras de adobe (los muros de la estructura tienen una altura que bordea los 7.00 m), el desplazamiento máximo de control es de aproximadamente 93 mm, lo cual sirve para estimar la falla y colapso de los elementos. En la Figura 17 se identifica los muros cuyo desplazamiento U1 sobrepasa el desplazamiento máximo de control y corresponde al colapso estructural de esos muros.

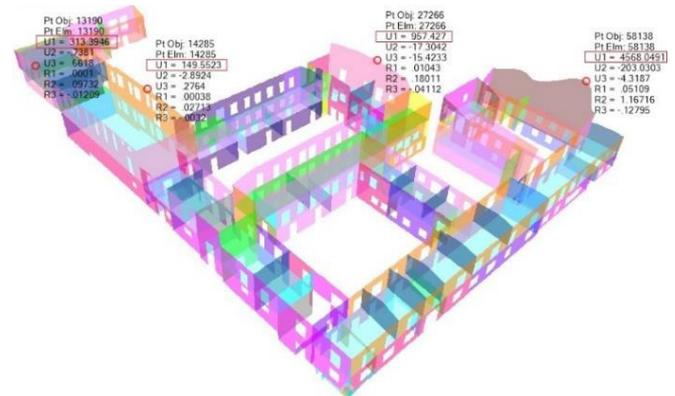


Figura 17. Distribución de desplazamientos con sismo en dirección X – Estructura en estado actual. (desplazamiento U1 en mm) SAP2000 v15.2.1

3.2. Alternativas de rehabilitación sísmica

Como parte fundamental para la rehabilitación de la edificación se requiere evaluar el comportamiento del sistema estructural resistente frente al sismo de diseño de acuerdo a la normativa vigente (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014). El sistema resistente se identifica como muros resistentes a carga lateral conformados principalmente de materiales elaborados con tierra amasada, tapia, adobe y bahareque.

La deficiencia sísmica se debe principalmente al gran peso de la estructura, a la baja capacidad de desplazamiento y al comportamiento frágil del material que componen los muros. Durante terremotos severos los modos típicos de falla se traducen en agrietamientos graves, desintegración de muros, separación de muros en las esquinas y desprendimiento de los techos respecto de los muros (Blondet, García y Brzev, 2003). Además, las fallas de las estructuras de adobe no reforzado son frágiles debido a la poca resistencia a la tracción del material

4. CONCLUSIONES

En esta investigación se han presentado resultados de un estudio analítico referente al análisis de vulnerabilidad y rehabilitación sísmica para el caso de una estructura patrimonial elaborada con tierra. Se propone una metodología simplificada, que complementa a otras existentes, para realizar un análisis mediante elementos finitos con la ayuda de programas comerciales como SAP2000 v.15.

La estructura analizada está dispuesta por un sistema resistente a carga lateral compuesta de muros de adobe. La metodología propuesta basada en análisis lineal estático y pseudo dinámico (análisis modal espectral) se considera aplicable, en primera instancia, con el objetivo de poder realizar un mapeo que permita identificar las zonas más vulnerables de la estructura para proyectar alternativas de reforzamiento viables. El uso de estas metodologías ha sido ampliamente utilizado para estructuras porticadas, sin embargo, estas metodologías no pueden modelar correctamente el caso real de estructuras de adobe. Debido a la falta de modelos que puedan representar los mecanismos de colapso de estructuras de adobe se utiliza el análisis lineal y modal espectral para tener una primera estimación. Debido a las limitaciones de los modelos simplificados los resultados obtenidos a partir de ellos deben ser evaluados con criterio y verificados en futuras investigaciones mediante modelos computacionales más reales.

El análisis lineal estático y pseudo dinámico son ampliamente empleados en estructuras tipo edificación de materiales más resistentes que el adobe como el hormigón armado o el acero estructural. Estos sistemas pueden ser idealizados con masas concentrada en el sistema de entrepiso (losas), pero este caso no corresponde a estructura compuestas de muros de adobe. Por lo que resulta necesario contemplar un sistema de masas acopladas en las que se tome en cuenta la incidencia por esfuerzo y desplazamiento de cada elemento muro sobre los muros o elementos adyacentes.

Se debe tener en cuenta que un análisis modal en el caso de estructuras de gran irregularidad y gran volumen como la estudiada no resulta aplicable ya que los modos de vibración están ampliamente dispersos y el porcentaje de participación modal es demasiado bajo comparado con el mínimo de por lo menos 90% de acuerdo a la NEC-SE-DS. Una manera de controlar esta dispersión de los modos de vibración recae en crear bloques estructurales que a su vez estén separados de otros por medio de juntas de construcción.

Normativas extranjeras como la Norma Peruana para Adobe (E080) y la Norma Chilena-Intervención de Construcciones Patrimoniales de Tierra Cruda (NCh3332) recomiendan modelos más simplificados para el diseño sísmico en el que se estima una componente horizontal equivalente en función del peso propio de la estructura para representar el efecto de una carga sísmica lateral por medio de un método estático. Se hace notar que estos métodos no contienen el efecto de regularidad geométrica ni coeficiente de importancia de la estructura. Además, no consideran el colapso progresivo de este tipo de estructuras.

La irregularidad en planta presente en la estructura analizada se toma en cuenta, empleando un concepto similar al utilizado en estructuras de tipo edificaciones, mediante el uso de factores de regularidad tanto en planta como en elevación ($\bar{O}P$ y $\bar{O}E$). Estos factores generalmente se traducen en factores de mayoración de la demanda sísmica. Estos factores se usan principalmente en estructuras porticadas, pero a falta de una normativa particular para estructuras de adobe se las utiliza de forma similar para el análisis presentado en este documento. No obstante, no se tiene un fundamento técnico para la selección de estos factores de regularidad para estructuras de adobe. Se recomienda que estas estructuras sean lo más regulares posibles para que estos sistemas tengan un óptimo desempeño.

La irregularidad en planta afecta a las diferentes formas de vibración de la estructura. Una estructura se considera irregular si una parte de la estructura concentra mayor masa y/o rigidez respecto de otra. La estructura del antiguo Colegio Simón Bolívar presenta serios problemas de irregularidad en planta por lo que es recomendable la división de esta estructura en bloques regulares mediante la creación de juntas estructurales.

El material del que están compuestas la mayoría de las estructuras patrimoniales es tierra amasada, tapia, bahareque y adobe. Estos materiales a lo largo de la historia han desarrollado diferentes técnicas de construcción que varían conforme la época. Estas técnicas hacen difícil estimar la capacidad real de estos materiales sin realizar los ensayos correspondientes (son muy complejos de realizar porque difícilmente se logra conseguir muestras inalteradas sin comprometer la integridad de la estructura). En el caso de la estructura del colegio Simón Bolívar se pudo verificar con el poco muestreo disponible que muchos muros de un mismo sector tenían bloques elaborados con diferentes técnicas y de épocas diferentes. Todo esto representa una importante limitación que finalmente incurre en estimar capacidades de materiales sumamente bajas para solventar la incertidumbre existente. De acuerdo con las diferentes investigaciones citadas se consideró como esfuerzos permisibles a corte para el muro de adobe de 2.5 Ton/m²; valor que es comparable y utilizado comúnmente para sistemas de muros de mampostería.

Se tiene como suposición que los elementos estructurales elaborados con tierra no incurrirán en el rango no lineal porque son sistemas estructurales frágiles que no tienen la capacidad de absorber energía por medio de desplazamientos o daño estructural. Además, el procedimiento propuesto en este trabajo es limitado ya que no contempla el hecho de que la estructura sufre un daño gradual debido a las acciones cíclicas de los sismos. En un evento sísmico real existen cargas reversibles y los elementos con mayor vulnerabilidad irán progresivamente agrietándose y degradándose.

Otra limitante para tener en cuenta es el uso del factor de reducción de respuesta estructural (R) ya que supone un comportamiento dúctil para la estructura, pero al tratarse de un sistema elaborado en tierra se tendrá poca o casi nula ductilidad por lo que se propone asumir ($R=1.0$). Esto significa que no habrá reducción del sismo de diseño, sino que la

estructura debe ser diseñada para absorber la demanda sísmica completa. Se asume esta condición con la aclaración de que este caso no es real ya que los muros trabajaran linealmente hasta colapsar a corte. Después de lo cual deberían dejar de aportar a la rigidez del sistema ya que los elementos van fallando gradualmente. Esta propuesta tiene como limitante más relevante la incapacidad de considerar el colapso progresivo de la estructura.

El valor de $R=1$ es válido siempre y cuando la estructura se comporte linealmente sin fallar ante el sismo de diseño. Por el contrario, las estructuras de adobe ante un sismo real van a fallar por corte o por volteo, pero estos mecanismos de falla no pueden ser modelados en SAP 2000 v.15. Sin embargo, la validez del factor de reducción $R=1$ para estructuras de mampostería puede ser estimada mediante el mecanismo de volteo de un cuerpo rígido. Si la resistencia a corte del adobe no es superada y si la fuerza de volteo no es superada por la demanda sísmica se puede asegurar que el muro de adobe trabaja linealmente ($R=1$). En realidad, el factor R es una deficiencia intrínseca del método basado en fuerzas para cualquier tipología, ya que no se tiene control de la ductilidad de desplazamiento que va a tener una estructura.

Comparando los valores de coeficientes de corte basal obtenidos de las normas citadas se evidencia la gran diferencia entre ellos, por una parte, resulta dudoso considerar valores tan bajos como los que resultan del uso de las normas extranjeras cercanos al 30% ($C_v=0.30$). Por otra parte, resulta hasta cierto punto ilógico tener valores superiores a 1.00 ($C_v=1.20$) como porcentaje de carga sísmica reactiva para el caso de la norma local. Finalmente, la discusión puede recaer sobre el uso del factor de reducción de respuesta estructural (R) cuyo valor mínimo para estructuras de ductilidad limitada debería considerarse cercano a ($R=2.00$), generando coeficientes de corte basal inferiores a 1.00. Futuras investigaciones deben enfocarse a la determinación de R para estructuras patrimoniales de adobe.

Como resultado de este análisis respecto al mallado inicial por medio de elementos finitos con la ayuda de programas comerciales como SAP2000 y otros similares se obtuvo que el parámetro más significativo es la relación del ancho del elemento finito respecto a la longitud principal del elemento estructural (a/L); este parámetro debe oscilar entre valores de 0.13 a 0.25 o considerando el número de divisiones que se realiza a lo largo de la longitud principal del elemento estructural (L); se observa que el número de divisiones recomendado está entre 6 y 8 partes.

También se presenta la proporción vertical del elemento finito (a/h) cuyos valores recomendados van de 0.5 a 2.0. Todo esto con la finalidad de proponer un mallado inicial adecuado que garantice porcentajes de error mínimos para un análisis en base a esfuerzos y desplazamientos.

Con las alternativas tomadas para el reforzamiento se cumple con la filosofía de diseño sismo resistente a nivel de modelo. Es decir que la estructura sea capaz de resistir sismos de baja intensidad (Sismos Leves) sin sufrir daños, sismos moderados con daños reparables y sismos de mayor intensidad (Sismos Severos) sin provocar colapso.

Referente al reforzamiento en la práctica se debe considerar las siguientes observaciones; la presencia de incompatibilidad entre materiales como hormigón y adobe como en el caso de la viga cabeza de muro (hecha de hormigón) que actualmente está colocada sobre el muro de adobe. Además, el mejoramiento del material de forma localizada puede trasladar la vulnerabilidad hacia sectores que no hayan sido intervenidos adecuadamente. Finalmente, el uso de enchapes en unos sectores y en otros no para minimizar la intervención de la estructura no es recomendable ya que se generarían zonas de diferente capacidad. Se debe intervenir en todos los muros o en su defecto generar juntas de construcción que simplifiquen el comportamiento de la estructura.

Actualmente no existe en nuestro país normativas de construcción para estructuras de adobe y peor aún sobre evaluación y reforzamiento de estas por lo que el presente estudio empleó normas de países vecinos con gran experiencia en el tema de edificaciones patrimoniales elaboradas con tierra, como Perú, Colombia, Chile y México. Se nota que es necesario investigar sobre esta línea ya que el empleo de las normas ecuatorianas NEC-SE-DS o NEC-SE-Vivienda, en comparación con las normas citadas, incurre en coeficientes de corte basal que pueden resultar exagerados.

Resulta de gran interés encaminar futuros estudios para estructuras de este tipo con la finalidad de establecer lineamientos específicos sobre su evaluación y reforzamiento. Además, en investigaciones futuras se debe establecer recomendaciones y detalles constructivos para la construcción o reparación de estructuras de adobe o materiales similares. A la vez se hace énfasis en recordar que el material del que se constituye la estructura estudiada es abundante y sumamente económico lo cual puede solucionar el tema de viviendas de interés social.

REFERENCIAS

- Aguilar, J., Gonzalez, R., & Gómez, M. (2014). Análisis de vulnerabilidad de estructuras de adobe en Chiapas y alternativas para su reparación. *Research Gate*.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (1997). Manual para la Rehabilitación de Viviendas Construidas en Adobe y Tapia Pisada. *FOREC*, 1-90. Obtenido de <http://www.asosismica.org>
- Blondet, M., García, G. V., & Brzev, S. (Abril de 2003). Construcciones de Adobe Resistentes a los Terremotos. *Enciclopedia Mundial de la Vivienda*, 5-23. Obtenido de www.world-housing.net
- Bonilla, D., Merino, G., & Sosa, D. (2017). Study of Bamboo Physical Properties and its Application as Reinforcement in Adobe Structures. *International Review of Civil Engineering (I.R.E.C.E.)*, 8(4), 160-166. 10.15866/irece.v8i4.12380
- Casanovas, X., & Díaz, C. (2007). *Arquitectura Tradicional Mediterránea - Rehabilitación*. Barcelona, España: RehabiMed.

Instituto Nacional de Cultura y Patrimonio. (2014). Executive Summary State of Conservation of the City of Quito. *World Heritage 38 COM*. Retrieved from https://es.wikipedia.org/wiki/Quito#cite_note-state-11

JUNAC. (1984). *Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino- Junta del Acuerdo de Cartagena*. Lima, Perú.

Kowalsky, Mervyn. "Analysis and Design of Masonry Structures". North Carolina State University. Raleigh, NC. 19 abr. 2018.

López, F. S. (2013). La construcción tradicional en Ambato - Ecuador, a finales del siglo XIX y principios del XX. La piedra Pishilata. *Actas del Octavo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid, 573-580. Obtenido de http://oa.upm.es/21373/1/Doc_Archivo_Digital_UPM_web.pdf

Norma Chilena. (2013). Estructuras - Intervención de Construcciones Patrimoniales de Tierra Cruda - Requisitos del Proyecto Estructural. *NCh3332:2013*, 1-17.

Norma Ecuatoriana de la Construcción. (Diciembre de 2014). Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente. *NEC-SE-DS*.

Norma Peruana. (Mayo de 2006). Norma E.080. *El Peruano*, 310-316.

Novillo, H. (2012). *ONU-Restauración (Bloque Antiguo)*. Quito: A. Herberto Novillo R.

Paulay, T., & Priestley, M. N. (1992). Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings.

Sánchez, M. I. (2013). Vulnerabilidad sísmica de construcciones patrimoniales históricas de mampostería en Chile: Aplicación a los torreones españoles de Valdivia. (Tesis de pregrado), Universidad Austral de Chile. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcp659p/doc/bmfcp659p.pdf>

Structures, C. C. (2015). *Analysis Reference Manual SAP 2000 v.2015*. Berkeley, California: USA: Computers and Structures.

BIOGRAFÍAS



Juan Pablo Chacón Sánchez

Consultor independiente en Ingeniería Civil, con experiencia de más de 15 años. Es ingeniero civil de profesión y con una maestría en Ingeniería Estructural por la Escuela Politécnica Nacional. Su área de investigación se enfoca en análisis de estructuras

con hormigón armado.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4656-1412>



Betzabeth Suquillo Ronquillo

Desde 2018 es docente en el área de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica en la Universidad Técnica de Ambato. Estudiante de Doctorado en Ingeniería Civil en la Universidad de Chile. Obtuvo una maestría en Ingeniería en Ciencias mención Ingeniería Estructural, Sísmica y Geotecnia con el reconocimiento

de Distinción Máxima por la Universidad de Chile. Ingeniera Civil mención Estructuras graduada en la Escuela Politécnica Nacional (2014). Sus áreas de investigación están relacionadas al Análisis No Lineal con la metodología Diseño Basado en Desempeño, Control de Fisuración y Análisis de Peligro Sísmico. Identificador digital ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1837-0646>



Diego Sosa

Ingeniero Civil de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (2011). Máster en Estructuras de la Escuela Politécnica Nacional (2014). Profesor Auxiliar a tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional desde 2014. Actualmente es Candidato a

PH.D. en Ingeniería Mecánica y Estructural con especialización en Diseño Sísmico en la Universidad Estatal de Carolina de Norte. Sus áreas de investigación son el diseño sísmico basado en desplazamientos y la modelación no lineal de estructuras.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5008-8640>



Carlos Celi

Posee una maestría en Ingeniería Estructural mención SUMA CUM LAUDE de la Escuela Politécnica Nacional, posee más de 13 años de experiencia. Actualmente trabaja en el Departamento de Ingeniería Civil, de la PUCE. Su campo de investigación principal es la modelación matemática no lineal, generando varias publicaciones

científicas internacionales al respecto. Entre sus proyectos actuales destacan: 'Aplicación de redes neuronales artificiales (ANN) en la estimación de la fragilidad local en elementos de longitud cero', 'Generación de acelerogramas sintéticos con base en teoría del Caos y wavelets', Participa en el PRY. Training and Communication for Earthquake Risk Assessment - GEM'.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6061-3082>

Conditional Cash Transfers and Cognitive, Non-Cognitive Outcomes: The Case of the Bono de Desarrollo Humano in Ecuador

Izurieta, Gabriela ^{1,*} 

¹Ministerio de Educación, Quito-Ecuador.

Abstract: The BDH cash transfer is a social protection program directed to the poorest households in Ecuador. This paper examines the impact of the BDH cash transfer on cognitive and non-cognitive outcomes for students that want to enter a higher education institution. Close attention is put on the Ser Bachiller exam score, student's expectations, motivations and self-esteem. The data used corresponds to the Ser Bachiller data base and the Associated Factors Survey for the academic cycle 2016-2017 (one cross-sectional period). The short-term exposure to the program was evaluated building a pseudo-assignment index (pseudo RS index) and a regression discontinuity design. The main results show that households that are near the assignment score (28.2) have an increased probability of participating in the program that ranges from 7.1 to 7.9 percentage points. For the cognitive outcomes, IV estimates reveal that the BDH cash transfer has a statistically significant negative effect on the mathematics score that ranges from 0.35 to 0.43 points (over 10 points). Regarding the non-cognitive outcomes, the BDH has a negative impact on students' academic self-esteem on both, mathematics class that ranges from 0.25 to 0.28 percentage points) and a similar effect on language class and a statistically significant and negative impact on the expectation to obtain a master's degree of 0.21 percentage points.

Keywords: Cash transfers, attendance, cognitive skills, non-cognitive skills, poverty, development.

Transferencias Monetarias Condicionadas y Habilidades Cognitivas y No Cognitivas: El Caso del Bono de Desarrollo Humano en Ecuador

Resumen: El Bono de Desarrollo Humano (BDH) es un programa de protección social dirigido a los hogares más pobres del Ecuador. Este artículo examina el impacto de la transferencia de efectivo de BDH en las habilidades cognitivas y no cognitivas para los estudiantes que desean ingresar a una institución de educación superior. Se utiliza el puntaje del examen Ser Bachiller y la información sobre expectativas, motivación y la autoestima de los estudiantes en la Encuesta de Factores Asociados para el ciclo académico 2016-2017. Se evaluó la exposición a corto plazo al programa construyendo un índice de pseudo-asignación (pseudo índice RS) y un diseño de regresión discontinua. Los resultados muestran que los hogares que están cerca del puntaje de asignación del bono (28.2) tienen una mayor probabilidad de participar en el programa que varía de 7.1 a 7.9 puntos porcentuales. Para las habilidades cognitivas, las estimaciones con variables instrumentales revelan que la transferencia tiene un efecto negativo y estadísticamente significativo en el puntaje de matemáticas que varía de 0,35 a 0,43 puntos porcentuales. Con respecto a los resultados no cognitivos, el BDH tiene un impacto negativo en la autoestima académica de los estudiantes, tanto en matemáticas (varía de 0.25 a 0.28 puntos porcentuales), un efecto similar en lenguaje y un impacto estadísticamente significativo y negativo en la expectativa de obtener un título de cuarto nivel de 0.21 puntos porcentuales.

Palabras clave: Transferencias de dinero, habilidades cognitivas, habilidades no cognitivas, educación superior, pobreza, desarrollo.

1. INTRODUCTION

Poor cognitive² and non-cognitive³ development for children affects drastically their future. Literature on children's cognitive and non-cognitive development suggests that these skills are formed in different periods of time: cognitive skills are significantly developed in early life while non-cognitive

skills are built in a higher degree during adolescence (Dahl, 2004). The insufficiency of these capabilities in adulthood, limits an individual to achieve crucial opportunities such as having the appropriate food intake, being healthy, having self-esteem, participating in community life or having the expected level of education (Becker, 1981). Cognitive and non-cognitive skills are part of an individual's human capital

*g_izurieta@hotmail.com
Recibido: 20/02/2020
Aceptado: 06/01/2021
Publicado: 28/02/2021
10.33333/rp.vol47n1.06
CC BY 4.0

² Cognitive skills allow an individual to "understand complex ideas, to adapt effectively to the environment, to learn from experience, to engage in various forms of reasoning, to overcome obstacles by taking thought" (Neisser et al., 1996:77).

(Pfeiffer and Karsten, 2008) and their development depends on the various forms of investments made to improve them throughout the time (human capital accumulation). In this context, Becker (1981) proposes a model for adult human capital and expected earnings:

$$H_t = \Psi(x_{t-1}, s_{t-1}, E_t) \text{ with } \Psi_j > 0; j = x, s, E \quad (1)$$

Equation (1) shows the human capital production function H_t and is integrated by endowments inherited from parents (E) and by parental expenditures on children's skills (x), health, learning, motivation and public expenditures on their development (s). In a more recent study, Conger (2007) explains that not only the economic side (expenditures and endowments) is important to individuals' development but also the non-economic characteristics such as parents' good health, cognitive abilities, persistence or reliability that motivate children.

Families with enough economic resources can face optimal investments for their children; however, disadvantaged households face financial constraints and depend highly on the amount of public expenditures. The economic pressure on families is also a problem. The complexity of tackling difficulties as unmet material needs (e.g. food and clothing), the incapacity to pay bills, the inability to distribute the available resources and having to cut necessary expenses (health insurance and medical care) has a psychological link with economic distress (Conger, 2007: 179). Furthermore, families that struggle to find additional resources cause that parents are not involved in their childrearing. The lack of attention to children's development causes that children grow up with inadequate health levels, low school involvement, inadequate cognitive development and poor socio-emotional development (Mani et al. 2013; Schady et al. 2014).

The mentioned aspects become determinant for children growing in impoverished environments.

In this sense, public policy programs for children in low-income households are relevant policy interventions as they are effective in tackling childrearing problems by letting parents provide more attention to their children's development (Gershoff et. al, 2007; Wolf, Aber, & Morris, 2013). One of the most important social protection programs in this area is conditional cash transfers (CCT).

In theory, conditional cash transfers have the purpose of breaking the cycle of poverty and reducing inequality both, by redistributing resources and through the accumulation of human capital among poor households. These effects in poverty reduction happen in the short-term and long-term (Oosterbeek et al., 2008).

In the short-term CCT programs guarantee a minimum consumption level by providing an amount of money to disadvantaged families with the conditionalities of sending their children to schools and attending periodically health centers. The expected effect is increased school attendance

(Handa and Davis, 2006) and therefore dropout rates are expected to decrease. Additionally, more time learning at school is related with children's cognitive development (Yaqub 2002:1084). Furthermore, recent literature on behavioral economics points out that these programs are also associated with increased social skills, improved social behavior and better expectations about improvement of future life (Fernald et al. 2010; Handa et al. 2014; Attah et al. 2016).

In the long run, CCT programs are expected to accumulate human capital.

Combining the previous arguments, this study suggests the possibility that investing in poor households through money transfers may have positive effects on individuals' cognitive and non-cognitive development as well as positive effects on school attendance.

This study analyzes the impact of a cash transfer program in Ecuador on adolescents' cognitive and non-cognitive outcomes and school attendance. The focus on adolescents is important because it is considered that they have already developed some capabilities and are more conscious of the difference that the social aid makes on their families (Bettinger, 2010:20). Even though the transfer is a small monthly amount of \$50, past studies of this cash transfer evidence that it has effects on improving families' wellbeing. The novelty of this study is the data base used which belongs to the national exam to enter higher education and the survey that students must fill before taking it. Therefore, the study offers information for all the students that pursue higher education in Ecuador.

Most of the literature about these topics work with small samples and evaluate the effects of the transfer on outcomes related with the objectives of the cash transfer i.e. in-crease on household expenditure, increase on school attendance or increased use of health centers. Though they are highly important, the present analysis considers that cash transfers outcomes should be measured beyond the increase of school enrollment and family income. Considering that the final aim of these programs is human capital accumulation, the evaluation on cognitive outcomes is appropriate; furthermore, the inclusion of non-cognitive aspects is outstanding because they may be the factors that motivate an individual to stand out from poverty.

1.1 Background

Cash transfer programs are a development strategy in Latin America. The first countries that implemented them are Mexico (Oportunidades) and Brazil (Bolsa Familia) in the 90s. Since then, cash transfer programs have been adopted in most countries from Latin America as an antipoverty initiative.

In Ecuador, the cash transfer program is called the Bono de Desarrollo Humano (from now, BDH). This program aims to guarantee a minimum consumption level to improve households' living conditions and break the intergenerational

³ Non-cognitive skills are related with personality traits, patterns of thought, feelings and behavior (Borghans et al., 2008) such as preferences, motivation, sociability, emotional stability, cooperation, consistency of

interest, persistence, teamwork, risk aversion, self-control, decision making among others.

transmission of poverty (Ministry of Economic and Social Inclusion, 2018). The BDH conditionalities are called “co-responsibilities” and they are sending children to school and visiting health centers periodically. They are publicized as mandatory (see <https://www.inclusion.gob.ec/bono-de-desarrollo-humano1/>) but there is not a standardized procedure for the verification of conditionalities or a mechanism of sanction in case of non-compliance, therefore they are “soft conditionalities” (Mideros and Gassmann, 2017, p. 10). However, there is evidence that some beneficiaries think they are being tracked (Martínez et al. 2017).

Research on educational outcomes demonstrates that the BDH has positive and significant results on children’s school enrollment and attendance, that is, parents not only enroll their children in a school but they also make sure of sending them periodically. Schady and Araujo (2006) provide evidence on the basis of a randomized experiment of poor children in five provinces. They find a large and positive impact of the BDH on school attendance and a significant decrease in child work. Rosero and Martínez (2012) claim that the effect on school attendance is even bigger for households that take conditionalities as mandatory. In addition, Edmonds and Schady (2012) provide evidence that students from BDH families -aged between 6 and 17- reduce their involvement in economic activities because parents postpone their decision to send their children to work when they start receiving the transfer.

Claiming that the focus on enrollment and attendance is not enough to ensure that students are developing their human capital, Ponce and Bedi (2010) perform a short term study of the impact of the BDH on cognitive outcomes of students in second grade. They used the score of standardized test scores in mathematics and language to measure the program’s effect, however, the authors found no significant impact. However, these results are too premature since the data was analyzed one year and a half after the program started in 2003 and they use a small sample of students on rural areas and the capital of the country which may cause biased results.

Paxson and Schady (2010) did a related research about the impact of the BDH program on children’s development living in rural areas. The authors test two types of outcomes: cognitive skills and social development measured by the Behavior Problems Index. They collected data for six provinces (out of 22 provinces) in Ecuador and include measures of physical development, mother’s physical and mental health. The findings show null results for the whole sample but there are important effects on the poorest children: they have better cognitive and behavioral outcomes compared with the children that do not receive the transfer. These findings encourage the idea that beneficiaries’ children may grow in better conditions which in the long-term may be reflected in better educated adolescents with higher expectations about their future.

A more recent evaluation by Araujo et al. (2017) measures the effect of the BDH after 10 years of its implementation. They study the impact on school attainment, learning outcomes and employment status of young adults around 25 and 28 years old. What they found is that cognitive outcomes measured by total

scores and language, math scores are not improved in the long term. There is a small effect of the transfer on school attendance and a positive effect for secondary school completion, specially for girls. Nonetheless, the BDH effect was null for the probability of attending a higher education institution or labor status.

Based on the empirical evidence on the effect of the BDH, particularly on educational outcomes, there is a need to show the effect of the program for older children. The positive results of the program in children opens the question about whether the effect is also positive in adolescents, an age group that is important because they have greater autonomy specially with respect to their education.

Beyond school attendance, this research focuses on cognitive and non-cognitive outcomes (which may be driving cognitive outcomes). This goes by the hand with the reform of the Ecuadorian education system in recent years focused on improving quality and effective learning of students which is an improvement of the previous process that was focused on educational coverage and the elimination of illiteracy (National Institute of Educative Evaluation 2016:9).

The first hypothesis is that the BDH has a positive effect on school attendance provided that the transfer has a co-responsibility with parents sending children to school. The second hypothesis is that there is a positive relationship between the cash transfer and cognitive outcomes because it becomes an incentive for them to develop their own human capital, therefore, they might effort more in school. The third hypothesis is that BDH has positive impacts on students’ non-cognitive outcomes because it is related with an improvement in family’s emotional wellbeing by mitigating severe economic stress.

1.2 Empirical aspects: cash transfers and attendance, cognitive, non-cognitive effects

There are important pieces of evidence that show how cash transfers, in addition to having effects on school attendance, are related to changes in cognitive and non-cognitive outcomes. When students attend school, dropout rates are expected to decrease, and more children will be able to complete education levels. Time spent learning and effort in school are important predictors of cognitive performance (Yaqub, 2002, p. 1084). Then, a higher education levels incentive the development of cognitive abilities and non-cognitive abilities which is translated into higher productivity and improved social and economic conditions in the long term (Heckman et al., 2006, p. 8).

For instance, Duncan et al. (1994) demonstrate how a low family income is highly correlated with children’s, between 0 and 5 years old, cognitive and non-cognitive development. They find that this relation dominates other variables commonly related to children’s development such as maternal education, ethnicity and female headship. Furthermore, they find that poverty effects are cumulative, however, they claim that their results do not prove that increases in poor families’ income improves child outcomes. Dahl and Lochner (2005)

prove this aspect. The authors focus on children between 8 and 14 years old and find evidence that increases in family income are associated with an effect on test scores (mathematics and reading) and behavioral measures which supports the idea that income transfers to poor families can help to boost their cognitive and non-cognitive development. Is this argument the case of cash transfers?

Gneezy et al. (2011) cash transfers work as extrinsic incentives to beneficiaries that are expected to give parents and additional effort to take children to school and give them a better education. This may to boost students' motivation. However, they argue that empirical evidence supports three main findings:

1. Extrinsic incentives increase attendance and enrollment.
2. They have mixed results on school achievement and effort (cognitive and non-cognitive outcomes).
3. Extrinsic incentives have varied effect for certain groups of students (e.g. children and adolescents).

In the case of conditional cash transfers, the first type of findings is an expected effect because the programs are nudging parents with the conditionality on attendance which is only a proof of the effective implementation of the programs (Handa and Davis 2006, p. 518). However, when the conditionality relies on educational outputs, as better school achievements (linked with the second type of findings), monetary incentives seem to be less effective compared with incentives conditioned on educational inputs (school attendance), because students find it hard to turn their efforts into success (it also depends on their ability and motivation) (see Gneezy et al., 2011; Bettinger, 2010). The studies discussed below reflect these three types of findings and are focused on differences between children and adolescents in terms of attendance, cognitive skills and non-cognitive skills.

Behrman et al. (2005) find interesting effects by age groups of the cash transfer *Progresa* in Mexico. When the authors disaggregate the data, they find that the program participation has a negative effect on grade repetition (a decrease) and a improved school progression for children that are 6 to 10 years old. On the other hand, for older children aged from 11 to 14, the program decreases the dropout rate and motivates school reentry for the ones who dropped school previously. A similar result was found by Angrist et al. (2006) who evaluate the impact of secondary school vouchers in Colombia. They followed up a group of students that applied for the transfer in two occasions. On average, they were 13 years old the first time and 17 years old the second time. The authors find that the students that won the voucher have higher graduation rates from high school which suggests that the program is an incentive specially for the students at risk of repeating a school year.

Baez and Camacho (2011) evaluate the long-term effect of the *Familias en Acción* conditional cash transfer in Colombia and find that that students that received the transfer for a longer time were more likely to graduate from high school (the probability is higher for girls and students in rural areas). However, students do not have higher scores. As the authors

enlighten, the non-correlation between attendance and better school performance may be explained by the fact that if attendance increases then schools may get congested and then classrooms will be overcrowded. The attention that teachers provide to each student is affected and that can cause academic deficiencies. Other possible reason is that children in poverty conditions might feel less motivated and might have less capacity to improve their school performance.

Fernald et al. (2010) evaluate the effects of the Mexican cash transfer program *Oportunidades* on cognitive development, language ability and behavior problems. After 10 years of the program implementation, they did find a decrease in emotional problems, bad conduct and hyperactivity disorders. The study relates this finding to improvement in parents' mental health and the increase in family interactions caused by the reduction in economic stress. Additionally, they find evidence that the continuous receipt of the transfer is associated with higher verbal abilities, cognitive scores and reduced behavioral problems. This is closely associated with the improvement in psychological wellbeing of family members caused by the alleviation on feelings of financial strain and deprivation which was discussed on the previous section.

Results on non-cognitive outcomes are varied. The same cash transfer program *Oportunidades* was evaluated by Ozzer et al. (2009) with a quasi-experimental evaluation in children's behavior between 4 and 5 years old. They conducted a survey about children behavior problems on mothers and find a 10% decrease in aggressive/oppositional symptoms and no effect in anxiety/depressive symptoms. Another example is the study by Handa et al. (2014). The authors analyze the impact of a Kenyan cash transfer that encourages school retention of children. Specifically, they evaluate inter-temporal choices, risk aversion, quality of life, future well-being (in one, three and five years) and subjective future risk assessment (likelihood of a certain event would happen in the near future). Although the authors did not find effects of the program for the first two outcomes, they found that the cash transfer has positive effects on beneficiaries' expectations about their life's improvement in the future. They also found that beneficiaries feel happier and more positive about their future and their quality of life, an important impact related with their self-acceptance, environmental mastery and overall, with their self-efficacy.

Attah et al. (2016) provide evidence of how a cash transfer program can have effect on beneficiaries' well-being. They assess the impact of cash transfers in Kenya, Ghana, Zimbabwe and Lesotho with a mixed method evaluation on beneficiaries' psychological wellbeing (framed by the theory of Ryff and Singer, 1996). What the authors find is the presence of a self-reinforcing cycle that parts from the cash transfer and is followed by increased self-esteem, social integration, interactions and development outcomes that boost their self-efficacy. For instance, they bring to light that children (aged 6 to 17) value the fact that they were able to use clean clothing, to pay school fees and study material which allowed them to increase their self-acceptance. They found that cash transfers influenced the improvement relations with teachers and classmates (diminished stigma from teachers), their autonomy increased because their performance only

depended on their hard work and no other economic concerns which helped them to master over their environment. School performance was evidenced in Kenya derived from these results; while in Ghana, Zimbabwe and Lesotho the cash transfer gave them hope about improving their condition and beneficiaries were more self-reliant. It also helped them to be active participants in social life (self-acceptance) and the confidence to cope with their reality.

2. METHODOLOGICAL APPROACH

This research aims at assessing the impact of the BDH cash transfer on students' cognitive and non-cognitive outcomes. To achieve this objective, I used the database of the National Higher Education Exam Ser Bachiller for the year 2017 (one cross section). This database contains information on students' general characteristics such as sex, geographic area, type of school they attended, their exam score and the students' answers on the AFS. In addition, it contains information about living conditions which was used to build the RS score (assignment rule). This analysis used the latest assignment rule in 2013 (28.2).

It was necessary to verify that the parents of the students are the ones that received the transfer and no other family member such as grandparents, aunts, uncles or the student itself. For this end, two filters were applied. The first filter was used for the variable that indicates who is the head of the household. The selected cases were when the students declared that the head of the household is either his/her mother or his/her father. The second filter was used for the variable that indicates whether the students have children of their own: the students that declared to have children or are expecting one were excluded to guarantee that the student is not the one receiving the transfer. This is also an approach to isolate the effect of the cash transfer from beneficiary parents to their children. The last filter is the students that reported to be from 15 years old to 19 years old; birth dates that are considered valid.

The selected students are only Ecuadorians who took the exam for the first time and have a score. With these specifications, the Ser Bachiller data base has 92.367 students, however, the number of observations changes depending on how many students answered each of the questions that were used. For instance, there are groups of questions that had more than 50% of missing values.

The cognitive and non-cognitive outcomes used in the analysis come from the Ser Bachiller exam score and the AFS for the year 2017.

2.1 Cognitive skills: Ser Bachiller exam score

The cognitive outcomes measured used the Ser Bachiller standardized exam results. The general score assigned for these outcomes ranges from 0 to 10 and it is equivalent to the official score that ranges from 0 to 1000. The other four specific scores include the basic knowledge domains: mathematical domain, linguistic domain, scientific domain and social domain.

2.2 Non-cognitive skills: AFS

One of the challenges of this analysis was the non-cognitive measurement. Previous studies examining the relationship between non-cognitive skills and children's development use indicators that are already part of previously defined and validated scale. For instance, the Ryff and Singer (1996) wellbeing theory was used to describe changes in children's behavior when their parents receive the cash transfer. This wellbeing theory has its own validated scale constructed with specific groups of questions that were tested to reflect each dimension. The pitfall of applying this approach is that the questions on the AFS are not the same to the official questionnaire used to build Ryff's wellbeing scale. The questions in the AFS were not developed to measure a previously defined non-cognitive construct. Instead, they were developed to contextualize the characteristics that are important for students' development and are related to their cognitive achievements.

A relatively straight forward option was used. The variables were selected based on a literature review about non-cognitive skills. Three dimensions were selected: self-efficacy, academic self-esteem and expectations about higher education because they are more related with the type of questions on the survey and all of them are a possible effect of the cash transfer.

The indicator for the self-efficacy dimension comes from the response on the self-reflection of the student to the question: "I always feel that the acquired knowledge motivates me to investigate more, develop new ideas and put them into practice". This question is important because it captures the perception of the students about their non-cognitive capacity.

For the second dimension, the academic self-esteem, a relatively straight forward approach was followed to identify the indicators. In this case, the indicators selected were the response to the statements "I consider I am an excellent student in X class". For the third dimension on expectations, the variable selected is part of the sub-level of "Higher Education Expectations" on the survey where students reflect on the maximum level of studies that they expect to achieve. For this question the options were: 1) I don't know, 2) Baccalaureate, 3) Technical or Technological, 4) Superior or Third level (University), 5) Postgraduate: master's degree and 6) Postgraduate: doctorate. The level chosen is master's degree because it is the level after the level they are applying with the exam (third level). In total there are six non-cognitive outcomes.

The limitation of the approach used to measure the non-cognitive outcomes is that it is possible to infer conclusions only for the relation of each specific variable and the cash transfer i.e. it was complex to build a condensed non-cognitive index. Another potential limitation is that a technical variable selection approach was not used. The selected variables are of interest considering the theoretical review although it could be that there are other questions that best describe certain non-cognitive dimensions. Finally, the number of non-cognitive outcomes is a disadvantage for a deeper analysis for each

result. This could have been easier with one outcome that includes all the variables (an index).

Nevertheless, the weaknesses of this analysis are also its strength considering that the survey has many different variables that provide interesting information. The possibility to measure the impact for some of them is an opportunity to distinguish effects of the transfer on specific topics.

School attendance

2.3 School attendance

The variable for school attendance was approximated from the survey information. On the section of students' characteristics, the students are asked to select the frequency with which they miss classes for a complete day during the last month of classes. The response options are: 5 or more times, 3 to 4 times, 2 to 3 times, 1 to 2 times and never. To compute the school attendance, only the last option was considered to build a binary variable where 1 is assigned for the students that answered that they are never absent and 0 otherwise.

2.4 RS replication: the pseudo-RS index

Participation in the BDH program is linked to the RS index that is generated from the information in the National Social Registry. For this analysis, I created a pseudo-RS index with the available variables in the Ser Bachiller database and assigned a score to each student.

The original RS index was created with 34 welfare variables. The available database allowed the replication of 21 variables which were assigned with the original weights and constructed the total RS as a summation of them as is denoted by equation (2):

$$RS = \alpha + \sum_{i=1}^{21} \beta_i X_i \quad (2)$$

Where α is a constant term (known from the methodology), β are the original weights and X are the set of replicated variables. This assured that the pseudo-RS index that was built approximate as possible to the original index.

2.5 Effect estimation: RDD

Considering the program design, a simple OLS to compare beneficiaries and non-beneficiaries would yield biased estimates effect: not all the beneficiaries' characteristics are the same, a condition necessary to detect the effect of the BDH. Even if the sample is filtered for those around the threshold, OLS estimates do not consider the endogeneity that arises with program selection and the change on the probability of being treated. The RDD approach approximates a randomized experiment for those around the threshold which is a more sensitive method to establish a causal impact of the program.

This section outlines the assumptions necessary to use a regression discontinuity design (RDD). The principal assumption is the "no manipulation" of the treatment assignment rule which means that the households that receive

the transfer must not be able to select themselves into the program. If this condition is not met, then it implies that there is not a random selection component around the threshold and the regression discontinuity design would be the wrong approach. However, it is not possible that households that receive the transfer are able to perfectly manipulate their score.

First, beneficiaries do not have knowledge about which variables are used to build the RS score and neither the weights that each variable has. Second, even though they may know the cutoff score (which is highly unlikely), they do not know their own score. In a practical sense, it is not possible that beneficiaries can modify their RS score so that they can receive the transfer. Additionally, it can be noticed that the RS score density plot in Figure 1 does not show any visible discontinuity around the cutoff score (red line); the RS density is very similar to the normal density plot. For instance, if beneficiaries could be able to select themselves into the program then there would be grouping around the red line.

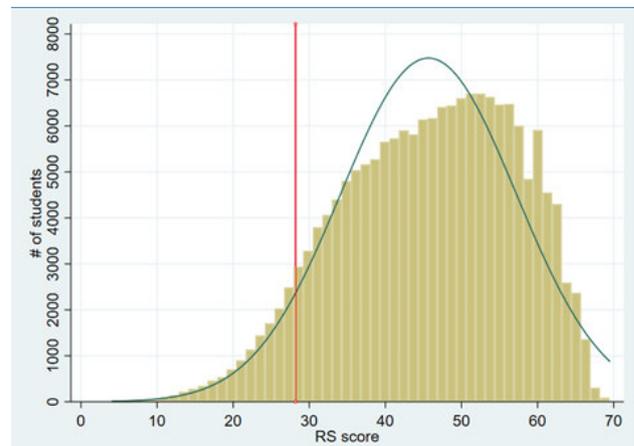


Figure 1. RS score density plot

In addition, the use of the regression discontinuity approach requires that the probability of receiving the BDH conditional on the RS score changes discontinuously at the threshold (28.2). Figure 2 displays two aspects. First, there is a discontinuity on the probability of treatment (to receive the BDH) at the cutoff score and that second, the treatment assignment rule is not perfect, which generates a non-linear relation between the RS score of each student and the actual treatment status (whether they receive or not the transfer).

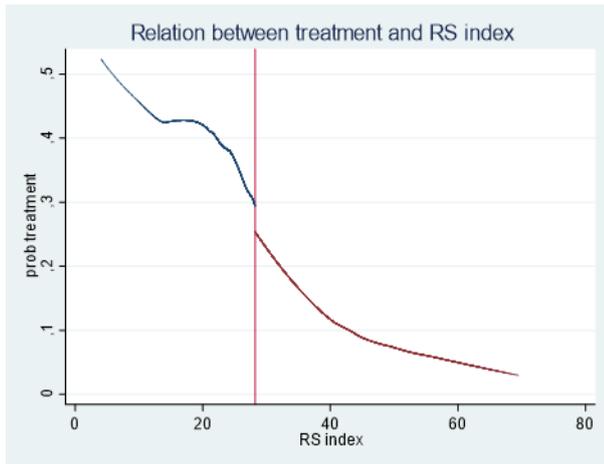


Figure 2. Relation between treatment and RS index

Previous studies have demonstrated that the BDH has targeting problems, just like any other cash transfer program. There are eligible households that do not receive the transfer (exclusion mistargeting) and not eligible households that are receiving the transfer (inclusion mistargeting). For instance, Rinehart and McGuire (2017) evaluate the BDH using the Living Conditions Survey (ECV) to measure these targeting problems. Out of the 11.410 BDH beneficiaries (household level) in the survey, 35% of them are part of the inclusion mistargeting while the exclusion mistargeting affected 35% of the eligible population. Table 1 shows the statistics for this analysis. Out of 92.367 beneficiaries, the 74% of them are part of the inclusion mistargeting whereas from the non-beneficiaries the 6% should receive the BDH.

Table 1. Treatment status according to RS index

	More than 28.2	Less than 28.2	Total
Non-beneficiaries	76087 94%	4945 6%	81032 100%
Beneficiaries	8351 74%	2984 26%	11.335 100%
Total	84438	7929	92367

Continuing with the empirical approach, the regression discontinuity is a good method to study the groups that are surrounding the cutoff line in 28.2. Students that are close to the cut off score are supposed to be comparable considering that they have the same characteristics and their only difference is that one group receives the treatment and the other does not. This can be evidenced on Table 2 where I use a difference in means test to check if the selected observable characteristics are statistically different between beneficiaries and non-beneficiaries adding three types of subsamples that are ± 1 , ± 2 and ± 3 points around the cut off score. Only two of them present significant differences (area and number of household members) whereas the others are not statistically different from each other (the subsamples are balanced).

Table 2 Descriptive statistics for selected variables around cutoff (28.2)

	Difference Cutoff ± 1	Difference Cutoff ± 2	Difference Cutoff ± 3
Female student	-0,042* '(0,02)	-0,014 '(0,02)	-0,014 '(0,01)
Area	0,167*** '(0,02)	0,138*** '(0,01)	0,126*** '(0,01)
Number of household members	-0,111*** '(0,03)	-0,100*** '(0,02)	-0,100*** '(0,02)
Illiterate mother	0,013 '(0,01)	0,006 '(0,01)	0,003 '(0,01)
ISEC (Socioeconomic index)	-0,01 '(0,02)	0,009 '(0,01)	0,016 '(0,01)
N	2793	5435	8276

This means that the assignment rule to the treatment (BDH) works as a randomized experiment near the cut off score.

The clear jump on the probability of treatment and the non-linearity of the assignment rule require a fuzzy regression discontinuity design⁴ (RDD). The fuzzy design exploits the discontinuity on the probability of being treated by using it as an instrument to explain the treatment status. Fuzzy RDD estimation strategy is a two-stage least squares regression analysis (2SLS). Additionally, to test the causal effect of the BDH program, following Hahn, Todd, and van der Klaauw (2001), I estimated the treatment effect with an instrumental variable (IV) setup:

IV-First stage:

$$D_i = \alpha_0 + \alpha T_i + \alpha_{RS} f(RS_i) + \alpha_x X_i + w_i \quad (3)$$

IV-Second stage:

$$Y_i = \beta_0 + \beta D_i + \beta_{RS} f(RS_i) + \beta_x X_i + u_i \quad (4)$$

Reduced form:

$$Y_i = \theta_0 + \theta T_i + \theta_{RS} f(RS_i) + \theta_x X_i + v_i \quad (5)$$

For equations 3 to 5, Y_i is the outcome variable, X_i is a vector of individual, household and educational characteristics and w_i , u_i and v_i random error terms. T_i is the instrument and it based on the decision rule for the BDH assignment: it takes the value of 1 for those scoring below the cutoff in the RS index (28.2) and the value of 0 for those scoring above the cutoff.

By estimating (5), the endogenous treatment status D_i is instrumented by the cutoff T_i , conditional on the polynomial of RS. Equation (5) is the regression of the outcome variable Y_i on the instrument T_i . The fuzzy IV-RDD estimator is β is obtained as the ratio of the reduced form coefficient of the instrument on the instrument estimated on the first stage (Angrist and Pischke, 2014:229).

The non-linearity of the assignment rule observed in Figure 2 requires a fuzzy RDD where the probability functions $f(RS)$ can be approximated by pth-order polynomials (Angrist and Pischke, 2008).

The RDD strategy has some pitfalls that are worth to be mentioned. First, RDD assumes that the functional relation

⁴ In the Fuzzy RDD the probability of being treated does not changes from zero to one at the cutoff point (Imbens & Lemieux 2007).

between the outcome variable and treatment variable is known. If this relation is mis-specified, then the resulting estimates may be biased Ponce and Bedi (2010). Second, the resulting estimations are valid for the individuals that are around the cutoff line. It is not possible to generalize the results for all the individuals in the distribution.

Instead, an alternative approach that can be used is a difference in difference strategy but for that it is necessary to have data for one or more periods. However, the available information and the existence of the assignment rule permit to assume that the individuals around the cutoff line are randomized which is what is desired by an impact evaluation methodology

3. RESULTS

Two different specifications were used: specification 1 (column 1 in tables) includes the variables female student, household’s geographic location (urban or rural) and the RS polynomial., Specification 2 (column 2) ads variables about the type of school (public or private) and the time spent traveling to school in minutes (between 15 and 30 minutes, between 31 minutes and 1 hour or more than one hour), the number of household members and the mother’s education (basic general education, baccalaureate-technical or higher level).

5.1 Regression discontinuity estimates

Program participation is not random, and it is based on the RS index. This index was used to build a binary instrumental variable where 1 is assigned to the students which living conditions are below the allocation threshold and 0 if their score is above the threshold.

The first stage includes this instrument variable and provides the treatment effect (program participation) in the presence of the fuzzy discontinuity observed in Figure 2. Table 6 shows the estimates for equation (4). The difference in the number of observations for each specification is explained because of the non-response for some variables included in the specifications.

Table 3. RDD first stage (summary)

Variable	Specification 1	Specification 2
Below cutoff point of 28.2 (Z)	0.086*** (0.01)	0.075*** (0.01)
N	92367	92028
R ²	0.084	0.093
F-Statistic on excluded instrument	86.85***	65.12***

There is a significant effect of the instrumental variable on program participation. Students from households that have a score equal or lower than 28.2 have an increased probability of participating in the program that ranges from 7.5 to 8.6 percentage points. The F-statistic from the excluded instrument is statistically significant indicating that there is a relationship between participation in the BDH and the assignment rule.

The instrumental variable estimates the effect of the BDH on attendance, cognitive outcomes and non-cognitive outcomes are in Tables 7, 8 and 9 respectively. Considering that there are

mis-targeting inclusion problems (non-eligible households that receive the transfer) and mis-targeting exclusion problems (eligible households that do not receive the transfer), the effect is computed in the second stage as a ratio with the first stage-equation (3). In the case of the attendance outcome, the BDH program has a significant and positive effect on students’ attendance of about 0.40 percentage points.

Table 4. RDD second stage: IV estimates for attendance (summary)

	Attendance (1)	Attendance (2)
BDH student	0.405*** (0.14)	0.400*** (0.14)
N	92021	91865
R ²		

Then, the effect of the BDH program over the global score ranges from -0.34 to -0.35, significant effect at the 10% level of confidence. For the specific scores, the BDH has a negative and significant effect at the 10% level on the mathematics score that ranges from -0.37 to -0.44 points.

The effect of the BDH on sciences score is also negative significant at the 5% level of -0.49 points for specification 1 and -0.54 points for specification 2 (significant at the 10% level). The program effect for language, sciences and social studies scores is negative and non-significant.

Table 5. RDD second stage: IV estimates for cognitive outcomes (summary)

Panel A		Global Score (1)	Global Score (2)
BDH student		-0.343+ (0.18)	-0.352+ (0.21)
N		92367	92028
R ²		0.081	0.109

Panel B		Mathematics (1)	Mathematics (2)	Language (1)	Language (2)
BDH student		-0.373+ (0.20)	-0.440+ (0.24)	-0.309 (0.23)	-0.243 (0.26)
N		92367	92028	92367	92028
R ²		0.061	0.076	0.084	0.111

	Sciences (1)	Sciences (2)	Social Studies (1)	Social Studies (2)
BDH student	-0.488* (0.24)	-0.536+ (0.28)	-0.199 (0.23)	-0.186 (0.27)
N	92367	92028	92367	92028
R ²	0.040	0.055	0.046	0.066

In the case of non-cognitive outcomes, Table 9 shows that the effect of the BDH is small and positive for the motivation specifications, but they are not significant. Similarly, the BDH has a nonsignificant effect on the expected level of studies (master program).

The program has a negative and significant effect at the 5% level for the academic self-esteem on mathematics class that ranges from -0.23 to -0.26 percentage points. For the academic self-esteem on language class the effect is higher: negative and significant at the 5% level of confidence and ranges from -0.29 to -0.33 percentage points. The effects for the academic self-

esteem on sciences class and social studies class are not significant.

Table 6. RDD second stage: IV estimates for non-cognitive outcomes (summary)

Panel A				
	Motivation	Motivation	Expected Level	Expected Level
	(1)	(2)	(1)	(2)
BDH student	0.064	0.056	-0.187	-0.193
	(0.14)	(0.14)	(0.12)	(0.12)
N	91592	91427	92148	91999
R ²	0.016	0.017	.	.

Panel B				
	Esteem-Math	Esteem-Math	Esteem-Lang	Esteem-Lang
	(1)	(2)	(1)	(2)
BDH student	-0.228*	-0.258*	-0.294*	-0.327*
	(0.10)	(0.10)	(0.13)	(0.14)
N	46162	46071	46153	46062
R ²

	Esteem-Sci	Esteem-Sci	Esteem-Soc	Esteem-Soc
	(1)	(2)	(1)	(2)
BDH student	0.051	0.047	-0.127	-0.141
	(0.11)	(0.12)	(0.13)	(0.14)
N	46162	46069	46166	46074
R ²	0.004	0.010	.	.

6. DISCUSSION

The BDH cash transfer has varied results among attendance, cognitive and non-cognitive outcomes. By exploiting the program's design and using an RDD strategy, the study shows that the BDH has a positive impact on beneficiaries' attendance which gives continuity to the group of findings of the positive impact of the program on children's school attendance (Schady and Araujo, 2006; Rosero and Martínez, 2012). This effect also fits into the first type of findings that Gneezy et al. (2011) distinguished for conditional cash transfers. On the other hand, the BDH has a negative impact on the general score amongst those close to the program eligibility threshold. It may be that the BDH only retains low-performance students that would have dropped school if they would not be receiving the transfer as it was evidenced by Araujo et al. (2017) but does not motivates them to have better achievements compared with their pairs around the threshold.

Specifically, the BDH does not have a positive impact on mathematics and sciences scores amongst those close to the program eligibility threshold. Previous results for the Ser Bachiller exam evidence that the mathematics module is the hardest as it has the greatest percentage of students with insufficient results (whereas the best results are for the language module) (National Institute of Educative Evaluation, 2016, p. 103). The cognitive results for mathematics are linked with the negative impact found for the academic self-esteem. BDH students do not consider themselves excellent on the mathematics class and it may be the reason why they have an insufficient score on that exam module. The program has a negative impact on academic self-esteem for language class. Considering that language class requires more social interaction compared to mathematics class, it may be that BDH students feel less confident about interacting with their peers

or integrating in group activities and therefore do not consider themselves as good students on this class.

Another result is that BDH beneficiaries are not expecting to achieve a higher education level (fourth degree) than the one they are applying for (undergraduate education) compared with no beneficiaries close to the program eligibility threshold. This is coherent with the fact that students that perform bad on school tend to have lower expectations for their future and feel less motivated to achieve higher education levels (Little, 2017, p. 32). The results may be also related with Kearney and Levine's claim about how the lack of resources lead young household members to perceive lower returns of educational investments made on them which in turn affects their decision to aspire for a higher educational level (Kearney and Levine, 2016, p. 335). Though the overall household income is affected by the transfer, it is not translated into better academic achievements.

Another explanation related with the results is that because of the increased attendance, classrooms may be congested which affects negatively to students' learning. As it is argued by Bandura (1994), a more personalized classrooms enable students to receive individualized instruction and helps them to improve their perceived capabilities, expand their competencies and provides less basis for demoralizing social comparison (Bandura, 1994, p. 12). Congested classrooms are usual in Ecuador. The Ecuadorian legislation allows to have at most 40 students per room in public schools (Ministry of Education, 2017) but, educational institutions tend to have more than the limit. Moreover, it is a fact that the poorest groups assist to public schools; in the case of the data used on this study, 85% the BDH students attend to a public school.

Though the findings are not related with better school performance, the fact that adolescents are attending school reduces the probability of engaging in risky situations if they have more free time (alcoholism, drug addiction, teenage pregnancy, etc.). On the other hand, as it is argued by Wolf et al. (2013), cash transfers can also have unintended consequences as they can encourage beneficiaries to stop investing in further education or stop working because of the incoming amount of money that the receive periodically. It means that cash transfers generate dependency feelings towards the government's social assistance which is not motivating beneficiaries to improve their living conditions.

The findings of this study show that beneficiaries are only attending school, which was claimed by Wolf et al. (2013) as the main effect of cash transfers on adolescents, but it is not translated into better achievements, more motivation or expectations which are the also important elements to improve their conditions and a more conscious solution to reduce inequality gaps and break the cycle of poverty. These students are only graduating from high school, but they do not own the necessary capacities to face the next educational level or to perform well on a job which detracts the goal of social assistance of improve the lives of beneficiaries. Are cash transfers just a money "handout"?

7. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The BDH cash transfer program has negative effects on cognitive and non-cognitive measures. Though the impact on school attendance is positive, it is not translated into better academic achievements or increased motivation, self-esteem or expectations.

The results indicate that students that are near the assignation score (28.2) have an increased probability of participating in the program of 7.5 to 8.6 percentage points. The BDH has a statistically significant positive impact on school attendance of around 0.40 percentage points amongst those close to the program eligibility threshold.

For the cognitive measures, the program revealed a statistically significant negative effect on the general score that ranges from -0.34 to -0.35 points and a negative and significant effect for the mathematics and sciences score. For the non-cognitive outcomes, the BDH has a negative impact on students' academic self-esteem in mathematics (ranging from 0.23 to 0.26 percentage points) and in language class (ranging from 0.29 to 0.33 percentage points).

The present study does not examine long-term effects of the BDH cash transfer. In this sense, any result is an inference for the year 2017. On the educational sphere, even if the transfer is promoting school attendance it does not imply that children are doing better in school and feel motivated enough to pursue an improved wellbeing condition. Handa and Davis (2006) point out that the increases on school attendance is only a proof of effective implementation of the programs as they are conditioned on parents sending their children to school, but this does not mean that children are better educated. Additionally, it is important to highlight the conclusion that many of the authors have claimed about these programs: demand side interventions are not sufficient to boost educational outcomes; these programs must go with the hand of improvements in education quality (e.g. better curriculums) and well-trained school teachers (Ponce and Bedi, 2010; Handa and Davis, 2006).

Further studies should consider long-term analysis to check if the continuous receipt of the monetary compensation meet program's long-term objectives: human capital development. It is also important to check the role of conditionalities, whether they should be strong conditionalities or the program should be unconditional.

These findings and previous studies findings must be considered to improve the program and add new elements that can help to accomplish them. For instance, there are cash transfer programs that are mixed with familiar psychological stimulation (interventions that support parents) and have significant benefits on tests for cognitive outcomes like reading and mathematics and non-cognitive outcomes such as self-esteem or social inhibition in the long term (Walker et al., 2011; Fernald et al., 2017). Finally, it is also important to understand how child development (e.g. cognitive and non-cognitive skills), parents' behavior and home environment interact with socioeconomic status and the cash transfer

REFERENCIAS

- Angrist, J.D. and J. Pischke (2014) *Mastering Metrics: The Path from Cause to Effect*. Princeton University Press.
- Angrist, J.D. and J. Pischke (2008) *Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion*. Princeton university press.
- Angrist, J., E. Bettinger and M. Kremer (2006) 'Long-Term Educational Consequences of Secondary School Vouchers: Evidence from Administrative Records in Colombia', *The American Economic Review* 96(3): 847-862. DOI: 10.1257/aer.96.3.847
- Araujo, M.C., M. Bosch and N.R. Schady (2016) 'Can Cash Transfers Help Households Escape an Inter-Generational Poverty Trap?', 'Can Cash Transfers Help Households Escape an Inter-Generational Poverty Trap?', *The Economics of Poverty Traps*, Cambridge, Mass.: National Bureau of Economic Research.
- Attah, R., V. Barca, A. Kardan, I. MacAuslan, F. Merttens and L. Pellerano (2016) 'Can Social Protection Affect Psychosocial Wellbeing and Why does this Matter? Lessons from Cash Transfers in Sub Saharan Africa', *The Journal of Development Studies* 52(8): 1115-1131. DOI: 10.1080/00220388.2015.1134777
- Baez, J.E. and A. Camacho (2011) 'Assessing the Long-Term Effects of Conditional Cash Transfers on Human Capital: Evidence from Colombia', *IZA Discussion Paper No. 5751*.
- Bandura, A. (1994) 'Self-Efficacy', V. S. Ramachandran edn. Vol. 4. pp. 71-81. New York: Academic Press.
- Bandura, A. (1997) *Self-Efficacy: The Exercise of Control*. New York, NY, US: W H Freeman/Times Books/Henry Holt & Co.
- Becker, G.S. (1981) *A Treatise on the Family*. Harvard university press.
- Becker, G.S. (1993) *Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education*. (3rd ed. edn) Chicago: The University of Chicago Press.
- Behrman, J., P. Sengupta and P. Todd (2005) 'Progressing through PROGRESA: An Impact Assessment of a School Subsidy Experiment in Rural Mexico', *Economic Development and Cultural Change* 54(1): 237-275. DOI: 10.1086/431263
- Bettinger, E.P. and National Bureau of Economic Research. (2010) 'Paying to Learn : The Effect of Financial Incentives on Elementary School Test Scores.', *NBER Working Paper No. 16333* 94(3).
- Borghans, L., A.L. Duckworth, J.J. Heckman and B. Ter Weel (2008) 'The Economics and Psychology of Personality Traits', *Journal of human Resources* 43(4): 972-1059.
- Calonico, S., M.D. Cattaneo and R. Titiunik (2014) 'Robust Nonparametric Confidence Intervals for regression-discontinuity Designs', *Econometrica* 82(6): 2295-2326. <https://doi.org/10.3982/ECTA11757>
- Casullo, M.M. and A.C. Solano (2000) 'Evaluación Del Bienestar Psicológico En Estudiantes Adolescentes Argentinos (Evaluation of Psychological Wellbeing in Argentinean Adolescent Students)', *Revista de*

- Psicología* 18(1): 35-68. <https://doi.org/10.18800/psico.200001.002>
- Chowdry, H., C. Crawford, L. Dearden, R. Joyce, L. Sibietta, K. Sylva et al. (2010) 'Poorer children's Educational Attainment: How Important are Attitudes and Behaviour', *Joseph Rowntree Foundation* : 1-72.
- Coleman, J.S. (1988) 'Social Capital in the Creation of Human Capital', *American Journal of Sociology* 94: S95-S120.
- Conger, R.D. and M.B. Donnellan (2007) 'An Interactionist Perspective on the Socioeconomic Context of Human Development', *Annual Review of Psychology* 58(1): 175-199. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.58.110405.085551>
- Cunha, F. and J. Heckman (2007) 'The Technology of Skill Formation', *American Economic Review* 97(2): 31-47. DOI: 10.1257/aer.97.2.31
- Dahl, G.B. and L. Lochner (2005) 'The Impact of Family Income on Child Achievement', NBER Working Paper No. 11279.
- Dahl, R.E. (2004) 'Adolescent Brain Development: A Period of Vulnerabilities and Opportunities. Keynote Address', *Annals of the New York Academy of Sciences* 1021(1): 1-22. DOI: 10.1196/annals.1308.001
- Dercon, S. and P. Krishnan (2009) 'Poverty and the Psychosocial Competencies of Children: Evidence from the Young Lives Sample in Four Developing Countries', *Children Youth and Environments* 19(2): 138-163.
- Duckworth, A.L., P.D. Quinn and M.E.P. Seligman (2009) 'Positive Predictors of Teacher Effectiveness', *The Journal of Positive Psychology* 4(6): 540-547. DOI: 10.1080/17439760903157232
- Duncan, G.J., J. Brooks-Gunn and P.K. Klebanov (1994) 'Economic Deprivation and Early Childhood Development', *Child development* 65(2): 296-318. <https://doi.org/10.2307/1131385>
- Edmonds, E.V. and N. Schady (2012) 'Poverty Alleviation and Child Labor', *American Economic Journal: Economic Policy, American Economic Association* 4(4): 100-124. DOI: 10.1257/pol.4.4.100
- Emadpoor, L., M.G. Lavasani and S.M. Shahcheraghi (2016) 'Relationship between Perceived Social Support and Psychological Wellbeing among Students Based on Mediating Role of Academic Motivation', *International Journal of Mental Health and Addiction* 14(3): 284-290. <https://doi.org/10.1007/s11469-015-9608-4>
- Evans, G.W. and M.A. Schamberg (2009) 'Childhood Poverty, Chronic Stress, and Adult Working Memory.', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106(16): 6545-6549. <https://doi.org/10.1073/pnas.0811910106>
- Executive Function of Ecuador (2011) 'Ley Orgánica De Educación Intercultural (Organic Law of Intercultural Education)'. Education Regulation, Accessed 1 November 2018 <https://oig.cepal.org/sites/default/files/2011_leyeducacionintercultural_ecu.pdf>.
- Fernald, L.C.; Gertler, P.J. & Neufeld, L.M. (2009) '10-Year Effect of Oportunidades, Mexico's Conditional Cash Transfer Programme, on Child Growth, Cognition, Language, and Behaviour: A Longitudinal Follow-Up Study', *The Lancet* 374(9706): 1997-2005. DOI: 10.1016/s0140-6736(09)61676-7.
- Fernald, L.C., R. Kagawa, H.A. Knauer, L. Schnaas, A.G. Guerra and L.M. Neufeld (2017) 'Promoting Child Development through Group-Based Parent Support within a Cash Transfer Program: Experimental Effects on children's Outcomes.', *Developmental psychology* 53(2): 222-236. <https://doi.org/10.1037/dev0000185>
- Fischer, K.W. (1980) 'A Theory of Cognitive Development: The Control and Construction of Hierarchies of Skills', *Psychological review* 87(6): 477-531.
- Fiszbein, A. and N.R. Schady (2009) *Conditional Cash Transfers: Reducing Present and Future Poverty*. The World Bank.
- Gao, J. and R. McLellan (2018) 'Using Ryff's Scales of Psychological Wellbeing in Adolescents in Mainland China', *BMC psychology* 6(1): 17. <https://doi.org/10.1186/s40359-018-0231-6>
- Genicot, G. and D. Ray (2017) 'Aspirations and Inequality', *Econometrica* 85(2): 489-519. <https://doi.org/10.3982/ECTA13865>
- Gershoff, E.T., J.L. Aber, C.C. Raver and M.C. Lennon (2007) 'Income is Not enough: Incorporating Material Hardship into Models of Income Associations with Parenting and Child Development', *Child development* 78(1): 70-95. doi: 10.1111/j.1467-8624.2007.00986.x
- Gneezy, U., S. Meier and P. Rey-Biel (2011) 'When and Why Incentives (Don't) Work to Modify Behavior', *Journal of Economic Perspectives* 25(4): 191-210. DOI: 10.1257/jep.25.4.191
- Hahn, J., Todd, P., & van der Klaauw, W. (2001). Identification and estimation of treatment effects with a regression-discontinuity design. *Econometrica*, 69(1), 201-209.
- Handa, S. and B. Davis (2006) 'The Experience of Conditional Cash Transfers in Latin America and the Caribbean', *Development policy review* 24(5): 513-536. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7679.2006.00345.x>
- Handa, A., B. Martorano, C. Halpern, A. Pettifor and H. Thirumurthy (2014) 'The Impact of the Kenya CT-OVC on Parents' Wellbeing and their Children'.
- Haushofer, J. and E. Fehr (2014) 'On the Psychology of Poverty', *Science (New York, N.Y.)* 344(6186): 862-867. DOI: 10.1126/science.1232491
- Heckman, J.J., J. Stixrud and S. Uzrua (2006) 'The Effects of Cognitive and Noncognitive Abilities on Labor Market Outcomes and Social Behavior', NBER Working Paper No. 12006 24.
- Kearney, M.S. and P.B. Levine (2016) 'Income Inequality, Social Mobility, and the Decision to Drop Out of High School', *Brookings Papers on Economic Activity* 2018(1): 333-396.
- Little, A.W. (2017) 'Non-Cognitive' Constructs and Measures for the Young Lives School Surveys', Young Lives Working Papers 170.

- Macours, K., N. Schady and R. Vakis (2008) 'Can Conditional Cash Transfer Programs Compensate for Delays in Early Childhood Development', *Processed. World Bank, Washington, DC*.
- Mani, A., S. Mullainathan, E. Shafir and J. Zhao (2013) 'Poverty Impedes Cognitive Function.', *Science* 341(6149): 976-980.
- Martinez, D. (2016) 'Sistematización, Documentación y Estimación De Información Relacionada Con El Bono De Desarrollo Humano (BDH): Su Implementación," Timing" y Las Bases De Datos (Systematization, Documentation and Estimation of Information Related to the Human Development Bond (BDH): Its Implementation, Timing and Databases)'. Quito: Inter-American Development Bank, Ministry Coordinator of Social Development and Ministry Coordinator of Economic Policy.
- Martínez, D., T. Borja, N. Medellín and P. Cueva (2017) '¿Cómo Funciona El Bono De Desarrollo Humano?: Mejores Prácticas En La Implementación De Programas De Transferencias Monetarias Condicionadas En América Latina y El Caribe (How does the Human Development Bond Work? Best Practices in the Implementation of Conditional Cash Transfer Programs in Latin America and the Caribbean)' No. IDB-TN-1 350, Inter-American Development Bank.
- Mideros, A. and F. Gassmann (2017) 'Fostering Social Mobility: The Case of the Bono De Desarrollo Humano in Ecuador', Working Paper 2017-002. United Nations University-Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology.
- Mideros, A. and C. O'Donoghue (2015) 'The Effect of Unconditional Cash Transfers on Adult Labour Supply: A Unitary Discrete Choice Model for the Case of Ecuador', *Basic Income Studies* 10(2): 225-255.
- Ministry Coordinator of Social Development (ca. 2014) 'Reproducción Del Índice Registro Social-RS En La Encuesta Urbana De Empleo, Desempleo-ENEMDU (Reproduction of the Social Register-RS Index in the Urban Employment Survey, Unemployment-ENEMDU)', Methodological note. Quito: Office of Information, Analysis and Evaluation of the Social Sector.
- Ministry of Economic and Social Inclusion (2018) 'Bono De Desarrollo Humano (Human Development Bonus)' (a webpage of Ministry of Economic and Social Inclusion-Ecuador). Accessed 10/17 2018 <<https://www.inclusion.gob.ec/bono-de-desarrollo-humano/>>.
- Ministry of Education (2017) 'Planificación De Servicios Públicos Del Ministerio De Educación-Acuerto Nro. MINEDUC-MINEDUC-2017-00047-A (Planning of Public Services of the Ministry of Education-Agreement no. MINEDUC-MINEDUC-2017-00047-A)'. Agreement.
- Ministry of Education of Ecuador (2015) 'Estadística Educativa: Reporte De Indicadores (Educational Statistics: Indicators Report)', No. 1. Quito: Ministerio de Educación. Accessed 1 November 2018 <https://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/01/Publicaciones/PUB_EstadisticaEducativaVol1_mar2015.pdf>.
- National Institute of Educative Evaluation (2017) 'Ser Bachiller 2017: Ficha Técnica y Conceptual (Ser Bachiller 2017: Technical and Conceptual Report)'. Quito.
- National Institute of Educative Evaluation (2016) 'Resultados Educativos, Retos Hacia La Excelencia (Educational Results, Challenges Towards Excellence)'. Quito.
- National Secretariat of Planning and Development (2013) 'Plan Nacional Del Buen Vivir 2013-2017 (National Plan for Good Living 2013-2017)'. Quito.
- Neisser, U., G. Boodoo, T.J. Bouchard Jr, A.W. Boykin, N. Brody, S.J. Ceci et al. (1996) 'Intelligence: Knowns and Unknowns.', *American psychologist* 51(2): 77.
- Oosterbeek, H., J. Ponce and N. Schady (2008) 'The Impact of Cash Transfers on School Enrollment : Evidence from Ecuador', World Bank Policy Research Working Paper.
- Oprea, S.J., M. Buijzen and E.A. van Reijmersdal (2018) 'Development and Validation of the Psychological Wellbeing Scale for Children (PWB-c)', *Societies* 8(1): 18.
- Ozer EJ, Fernald LC, Manley JG and Gertler PJ (2009) 'Effects of a Conditional Cash Transfer Program on Children's Behavior Problems.', *Pediatrics* 123(4): 630-7.
- Palacio, M.G. (2016) 'Little People, Big Words: 'Generationating' Conditional Cash Transfers in Urban Ecuador', 'Little People, Big Words: 'Generationating' Conditional Cash Transfers in Urban Ecuador', *Generationing Development : A Relational Approach to Children, Youth and Development*, pp. 243-265. London : Palgrave Macmillan UK : Palgrave Macmillan.
- Paxson, C. and N. Schady (2010) 'Does Money Matter? the Effects of Cash Transfers on Child Development in Rural Ecuador', *Economic Development and Cultural Change* 59(1): 187-229. DOI: 10.1086/655458
- Pfeiffer, F. and K. Reuß (2008) 'Age-Dependent Skill Formation and Returns to Education', *Labour Economics* 15(4): 631-646.
- Ponce, J. and A.S. Bedi (2010) 'The Impact of a Cash Transfer Program on Cognitive Achievement: The Bono De Desarrollo Humano of Ecuador', *Economics of Education Review* 29(1): 116-125.
- Ponce, J. (2008) 'Educational Policy and Performance: Evaluating the Impact of Targeted Education Programs in Ecuador', Doctoral thesis. The Hague: Institute of Social Studies.
- Rosero, J. and J. Martínez (2012) 'Impacto Del Bono De Desarrollo Humano En El Trabajo Infantil (Impact of the Human Development Bonus on Child Labor)'. Quito: Ministry Coordinator of Social Development.
- Ryan, R.M. and E.L. Deci (2000) 'Intrinsic and Extrinsic Motivations: Classic Definitions and New Directions', *Contemporary educational psychology* 25(1): 54-67. <https://doi.org/10.1006/ceps.1999.1020>
- Ryff, C.D. and B. Singer (1996) 'Psychological Well-being: Meaning, Measurement, and Implications for Psychotherapy Research', *Psychotherapy and*

psychosomatics 65(1): 14-23.
<https://doi.org/10.1159/000289026>

- Schady, N., J. Behrman, M.C. Araujo, R. Azuero, R. Bernal, D. Bravo et al. (2014) 'Wealth Gradients in Early Childhood Cognitive Development in Five Latin American Countries', *Journal of Human Resources* 50(2): 446-463.
- Schady, N.R. and M.C. Araujo (2006) 'Cash Transfers, Conditions, School Enrollment, and Child Work: Evidence from a Randomized Experiment in Ecuador', World Bank Policy Research Working Paper No.3930.
- Schady, N.R. and J.L. Rosero (2008) 'Are Cash Transfers made to Women Spent Like Other Sources of Income?', *Economics Letters* 101(3): 246-248.
- Schultz, T.W. (1960) 'Capital Formation by Education', *Journal of Political Economy* 68(6): 571-583.
- Skinner, E.A., M. Zimmer-Gembeck and J.P. Connell (1998) 'Individual Differences and the Development of Perceived Control', *Monographs of the Society for Research in Child Development* 63(2-3): v-220.
- Walker, S.P., T.D. Wachs, S. Grantham-McGregor, M.M. Black, C.A. Nelson, S.L. Huffman et al. (2011) 'Inequality in Early Childhood: Risk and Protective Factors for Early Child Development', *The Lancet* 378(9799): 1325-1338.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)60555-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60555-2)
- Wolf, S., J.L. Aber and P.A. Morris (2013) 'Drawing on Psychological Theory to Understand and Improve Antipoverty Policies: The Case of Conditional Cash Transfers', *Psychology, Public Policy, and Law* 19(1): 3-14. <https://doi.org/10.1037/a0029498>
- Wuepper, D. and T.J. Lybbert (2017) 'Perceived Self-Efficacy, Poverty, and Economic Development', *Annual Review of Resource Economics* 9(1): 383-404.
<https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100516-053709>
- Yaqub, S. (2002) 'Poor Children Grow into Poor Adults': Harmful Mechanisms Or over-deterministic Theory?', *Journal of International Development: The Journal of the Development Studies Association* 14(8): 1081-1093. DOI: 10.1002/jid.951

BIOGRAPHY



Gabriela Izurieta received a master's degree in Development Studies with a major in Economics of Development and a specialization in Econometric Analysis of Development Policies from the Erasmus University, The Netherlands, in 2018. Her main interests are focused on economics of education, social security, behavioral economics and public policy analysis by using econometrics and impact evaluation methods. Her current position is at the Ministry of Education where she works on educational research focused on teacher's workload and rural schools. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8510-5949>

Preparación de Artículos para la Revista Politécnica Utilizar Mayúsculas en cada Palabra en el Caso del Título

Resumen: Las siguientes instrucciones establecen las pautas para la preparación de artículos para la Revista Politécnica. Los artículos pueden ser escritos en español o en inglés, pero tendrán un resumen de máximo 250 palabras en los dos idiomas. Los autores pueden hacer uso de este documento como una plantilla para componer su artículo si están utilizando Microsoft Word 2013 o superior. Caso contrario, este documento puede ser utilizado como una guía de instrucciones. El número mínimo de páginas será 6 y el máximo 15, Para el envío de los artículos, los autores deben seguir las instrucciones colocadas en el sistema de recepción de artículos del sitio web de la Revista Politécnica (revistapolitecnica.epn.edu.ec). En caso de que su artículo sea en inglés colocar el título y el resumen en los dos idiomas.

Palabras clave: Incluir una lista de 3 a 6 palabras.

Title of Manuscript

Abstract: These instructions give you guidelines for preparing papers for EPN Journal. Papers can be written in Spanish or English; however, an abstract of maximum 250 words and written in both languages is required. Use this document as a template to compose your paper if you are using Microsoft Word2013 or later. Otherwise, use this document as an instruction set. The minimum number of pages will be 6 and the maximum will be 15. For submission guidelines, follow instructions on paper submission system from the EPN Journal website(revistapolitecnica.epn.edu.ec).

Keywords:Include a list of 3 to 6 words.

1. SECCIÓN I

Este documento es una plantilla para versiones Microsoft Word 2013 o posteriores. Si está leyendo una versión impresa de este documento, por favor descargue el archivo electrónico, **revistapolitecnicaformato2020.docx**. En caso de que el autor desee enviar el artículo en formato LaTeX por favor comunicarse con la coordinación de edición (epnjournal@epn.edu.ec). *Por favor, no coloque numeración ni pie de página en el documento presentado.*

No cambie los tamaños de fuente o espaciado de renglones para ajustar el texto a un número limitado de páginas. Utilice cursiva o negrita para dar énfasis a un texto, no subrayado.

2. SECCIÓN II

Para las pautas de presentación, siga las instrucciones emitidas por el sistema del sitio web de la revista de la EPN.

La presentación inicial debe tomar en cuenta todas las indicaciones que se presentan en la plantilla, para de esta

manera tener una buena estimación de la longitud del artículo a publicarse. Además, de esta manera el esfuerzo necesario para la presentación final del manuscrito será mínimo.

Como sugerencia, es importante tomar en cuenta que, el primer autor es el investigador que hizo la mayor parte del trabajo, mientras que el último autor suele ser el profesor quien es el líder intelectual y, a menudo edita y presenta el borrador final del documento.

La Revista Politécnica pondrá en marcha un sistema de transferencia electrónica de derechos de autor en su momento. Por favor, "no" enviar formularios de derecho de autor por correo o fax. A continuación se detallan las consideraciones que se deben tener en cuenta para la presentación final del artículo.

3. SECCIÓN III

3.1 Figuras, tablas y márgenes

Todas las figuras deben ser incorporadas en el documento. Al incluir la imagen, asegúrese de insertar la actual en lugar de un

enlace a su equipo local. Los archivos de: figuras, dibujos, fotografías, etc., deberán enviarse en formato png, con al menos 1200 puntos (resolución) en uno de sus ejes, con leyendas legibles y de tamaño adecuado. El artículo debe contener entre tablas y figuras un máximo de 10.

Las etiquetas de los ejes de las figuras son a menudo una fuente de confusión. Utilice las palabras en lugar de símbolos. Por ejemplo, escriba la cantidad "Magnetización," o "Magnetización M" no sólo "M".

Las figuras y tablas deben estar en la parte superior e inferior de las columnas. Evite colocarlas en medio de ellas. Las figuras y tablas grandes pueden extenderse a lo largo de ambas columnas. Las leyendas de las figuras deben estar centradas debajo de las figuras, los títulos de las tablas deben estar centrados sobre ellas. Evite colocar figuras y tablas antes de su primera mención en el texto. Para la mención de figuras, tablas o ecuaciones utilice las palabras completas con la primera letra en mayúscula, por ejemplo "Figura 1".

Coloque las unidades entre paréntesis. No etiquete los ejes sólo con unidades. Por ejemplo, escriba "Magnetización (A/m)" o "Magnetización (Am⁻¹)", no sólo "Magnetización A/m." No etiquete los ejes con una relación de cantidades y unidades. Por ejemplo, escriba "Temperatura (K)", no "Temperatura K".

Los multiplicadores pueden ser especialmente confusos. Escriba "Magnetización (kA/m)" o "Magnetización (103A/m)". No escriba "Magnetización (A/m) x 1000" porque el lector no sabrá si la etiqueta del eje de arriba significa 16000 A/m o 0,016 A/m. Las etiquetas de las figuras deben ser legibles, con un valor de 8 y sin espacio de separación con la figura.

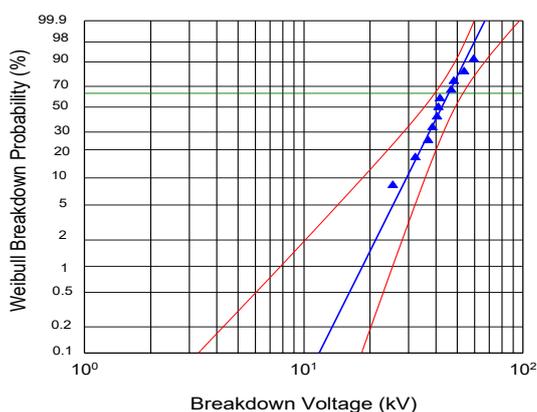


Figura 1. Distribución Weibull de 60 Hz voltajes de ruptura $\alpha = 45,9$ kV $\text{pico}\beta = 5,08$. Intervalo de Confidencia 95%

Los autores deben trabajar activamente con los márgenes solicitados. Los documentos de la revista serán marcados con los datos del registro de la revista y paginados para su inclusión en la edición final. Si la sangría de los márgenes en su manuscrito no es correcta, se le pedirá que lo vuelva a presentar y esto, podría retrasar la preparación final durante el proceso de edición.

Por favor, no modificar los márgenes de esta plantilla. Si está

creando un documento por su cuenta, considere los márgenes que se enumeran en la Tabla 1. Todas las medidas están en **centímetros**.

Tabla 1. Márgenes de página

Página	Superior	Inferior	Izquierda/ Derecha
Primera	2,0	2,5	1,5
Resto	2,0	2,5	1,5

3.2 Ecuaciones

Si está usando MSWord, sugerimos utilizar el *Editor de ecuaciones de Microsoft* o el *MathType* add-on para las ecuaciones en su documento (*Insertar/Objeto/Crear Nuevo/Microsoft Ecuación o Ecuación MathType*). La opción "flotar sobre el texto" no se debe elegir.

Enumere las ecuaciones consecutivamente con los números de la ecuación en paréntesis contra el margen derecho, como en (1). Utilice el editor de ecuaciones para crear la ecuación y esta debe estar localizada en el margen derecho, como se muestra en el ejemplo siguiente:

$$\int_0^{r_2} F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma r_2 / (2\mu_0)] \quad (1)$$

Asegúrese de que los símbolos en su ecuación han sido definidos antes de que aparezcan en la ecuación o inmediatamente después. Ponga en cursiva los símbolos (T podría referirse a la temperatura, pero T es la unidad tesla). Para referirse a la ecuación se escribe por ejemplo "Ecuación (1) "

3.3 Unidades

Utilice el SI como unidades primarias. Otras unidades pueden ser utilizadas como unidades secundarias (en paréntesis). Por ejemplo, escriba "15 Gb/cm² (100 Gb/in²)". Evite combinar las unidades del SI y CGS, como la corriente en amperios y el campo magnético en oerstedios. Esto a menudo lleva a confusión porque las ecuaciones no cuadran dimensionalmente. Si tiene que usar unidades mixtas, aclare las unidades para cada cantidad en una ecuación.

Por ejemplo, en el SI la unidad de fuerza de campo magnético Hes A/m. Sin embargo, si desea utilizar unidades de T, o bien se refiere a la densidad de flujo magnético B o la fuerza del campo magnético simbolizadas como $\mu_0 H$. Use un punto en el centro para separar las unidades compuestas, por ejemplo, "A·m²."

3.4 Abreviaturas y Siglas

Defina las abreviaciones y acrónimos la primera vez que se utilizan en el texto, incluso después de que ya han sido definidos en el resumen. No utilice abreviaturas en el título a menos que sea inevitable.

3.5 Otras recomendaciones

- Para expresar valores decimales se usarán comas, por ejemplo 3,45. Use un cero antes del decimal.
- Se incluirá un espacio entre números para indicar los valores de miles, por ejemplo 463 690.
- Utilice notación científica para expresar números con más de 3 cifras hacia la derecha o izquierda, es decir, mayores a 2,50E+05 o menores a 4,8E-03.
- Finalmente, de ser necesario y de manera opcional, se pueden incluir conclusiones, recomendaciones y agradecimiento.

REFERENCIAS

La lista de referencias debe estar en Formato APA ordenada alfabéticamente de acuerdo con el apellido del primer autor del artículo. El agregado et al no debe ir en cursiva. Por favor nótese que todas las referencias listadas aquí deben estar directamente citadas en el cuerpo del texto usando (Apellido, año). Las notas al pie deben evitarse en la medida de lo posible.

El artículo debe contener un mínimo de 6 referencias.

Seguir el formato indicado a continuación de acuerdo al tipo de referencia a:

Formato básico para referenciar libros:

Apellido, Inicial Nombre. (Año). *Título del libro*. Ciudad, País: Editorial.

- **Libros con un autor:**

En las referencias:

King, M. (2000). *Wrestling with the angel: A life of Janet Frame*. Auckland, New Zealand: Viking.

Cita en el texto:

(King, 2000) o King (2000) argumenta que ...

- **Libros con dos autores:**

En las referencias:

Treviño, L. K., y Nelson, K. A. (2007). *Managing business ethics: Straight talk about how to do it right*. Hoboken, NJ: Wiley

Cita en el texto:

(Treviño y Nelson, 2007) o Treviño y Nelson (2007) ilustran...

- **Libros con dos o más autores:**

En las referencias:

Krause, K.-L., Bochner, S., y Duchesne, S. (2006). *Educational psychology for learning and teaching* (2nd ed.). South Melbourne, VIC., Australia: Thomson.

Cita en el texto:

De acuerdo con Mezey et al. (2002) o ... (Mezey et al., 2002).

Formato básico para referenciar artículos científicos

Apellido, Inicial Nombre. (Año). Título del Artículo. *Título/Iniciales de la Revista*. Número de Volumen (Tomo), páginas

- **Artículos en revistas:**

En las referencias:

Sainaghi, R. (2008). Strategic position and performance of winter destinations. *TourismReview*, 63(4), 40-57.

Cita en el texto:

(Sainaghi, 2008) o Sainaghi (2008) sugiere ...

- **Artículos con DOI**

En las referencias:

Shepherd, R., Barnett, J., Cooper, H., Coyle, A., Moran-Ellis, J., Senior, V., & Walton, C. (2007). Towards an understanding of British public attitudes concerning human cloning. *Social Science & Medicine*, 65(2), 377-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.socscimed.2007.03.018>

Cita en el texto:

Shepherd et al. (2007) o Shepherd et al. (2007) resaltan la...

- **Artículos sin DOI**

En las referencias:

Harrison, B., & Papa, R. (2005). The development of an indigenous knowledge program in a New Zealand Maori-language immersion school. *Anthropology and Education Quarterly*, 36(1), 57-72. Obtenido de la base de datos AcademicResearch Library

Cita en el texto:

(Harrison y Papa, 2005) o En su investigación, Harrison y Papa (2005) establecieron...

- **Artículos en línea**

En las referencias:

Snell, D., & Hodgetts, D. (n.d.). The psychology of heavy metal communities and white supremacy. *Te Kura Kete Aronui*, 1. Obtenido de: <http://www.waikato.ac.nz/wfass/tkka>. (Mayo, 2015).

Cita en el texto:

(Snell y Hodgetts, n.d.) o Snell y Hodgetts (n.d.) identificaron "..."

INDEXACIONES



Matriz de Información para el
Análisis de Revistas



REVISTA
POLITÉCNICA



revistapolitecnica.epn.edu.ec



INDEX  COPERNICUS
I N T E R N A T I O N A L



revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



REVISTA
POLITÉCNICA



EPN
editorial

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec